

На правах рукописи

НАДЕЖКИНА ЕЛЕНА ВАЛЕНТИНОВНА

ЭКОЛОГО-АГРОХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ  
АЗОТНОГО РЕЖИМА ЧЕРНОЗЕМНЫХ ПОЧВ  
ЛЕСОСТЕПИ СРЕДНЕГО ПОВОЛЖЬЯ

Специальность 03.00.16 – Экология

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора биологических наук

Казань – 2004

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Пензенская Государственная сельскохозяйственная академия»

Научные консультанты: доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик РАСХН Кореньков Д.А.  
доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик РАСХН Минеев В.Г.

Официальные оппоненты: Копосов Г.Ф., д-р биол. наук, профессор  
Аканова Н.И. д-р биол. наук, с.н.с.  
Гайсин И.А. д. с-х.н., профессор

Ведущее предприятие: Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия

Защита диссертации состоится 20 апреля 2004 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного Совета Д 212.081.19 при Казанском государственном университете им. В.И Ульянова-Ленина по адресу: 420008 г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке им. Н.И. Лобачевского Казанского государственного университета

Автореферат разослан «    » 2004 г.

Ученый секретарь  
диссертационного Совета,  
доктор химических наук

Г.А. Евтюгин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Лесостепное Среднее Поволжье, куда входит Пензенская, правобережье Ульяновской, часть Самарской и Саратовской областей, – обширный регион, где в сферу активного сельскохозяйственного использования вовлечено более 71% всей площади земель, играющих важную роль в производстве зерна в Российской Федерации. Расположенный на Приволжской возвышенности, он характеризуется высокой активностью эрозионных процессов, что вызвано сведением плакорной растительности злаковоразнотравных луговых степей и лесов, распашкой кормовых угодий. Начиная с конца 18 века, когда была освоена данная территория, использование почвенных ресурсов носило эксплуатационный характер. Площадь пашни была завышена, введенные севообороты имели небольшую долю почвовосстанавливающих культур, использовались интенсивные обработки почвы с оборотом пласта, вынос биогенных элементов превышал их поступление. Все это и привело к усилению агродеградации основных почв региона – черноземов. За последние 100 лет было потеряно от 20 до 40% исходных запасов гумуса, произошло обесструктурирование почв, их переуплотнение, четко выражена тенденция к подкислению пахотного слоя (Русский чернозем, 1983; Щербаков, Васенев, 1996). Как итог: плодородие пахотных почв не воспроизводится, а продуктивный потенциал черноземов уменьшается. Сложившаяся ситуация требует разработки стратегии и тактики управления плодородием черноземов для получения максимально возможного количества сельскохозяйственной продукции высокого качества при сохранении агроресурсов, в первую очередь, почв и биоразнообразия (Добровольский, Никитин, 1990; Карпачевский, 1997; Структурно-функциональная..., 1999;).

Многими авторами предлагается компромиссная стратегия ведения сельского хозяйства (Кант, 1982; Одум, 1986; Жученко, 1990; Минеев, Дебрецени, Мазур, 1993). Она основывается на активизации естественного биологического потенциала с введением севооборотов с повышенной долей почвовосстанавливающих культур, в первую очередь бобовых, как потенциальных азотфиксаторов, поликультур, сидеральных посевов, на минимализации обработки почвы и в целом освоении адаптивно-ландшафтного земледелия (Кирюшин, 1993; Трепачев, 1999; Лопырев, Макаренко, 2001).

В то же время для компенсации элементов питания, использованных урожаями сельскохозяйственных культур, необходимы антропогенные субсидии – обязательное внесение некоторого количества минеральных удобрений, в первую очередь азотных, в умеренных дозах, с заделкой в почву. Система их использования должна основываться на биологических требованиях культур и с учетом результатов почвенной и растительной диагностики.

Проблема азота в земледелии России является одной из центральных не только в связи с первостепенной его ролью в питании растений, повышении урожайности и качества сельскохозяйственной продукции, но и вследствие широкого спектра негативного воздействия продуктов трансформации азота на окружающую среду. При интенсивном поступлении азота в почву усили-

ваются процессы его иммобилизации и мобилизации. Цикл азота становится более открытым, что может приводить к нарушению динамического равновесия и изменению направленности процессов внутрипочвенной трансформации природного и технического азота. Усиление минерализации почвенного азота приводит к нарушению экологической стабильности агроэкосистем, выражающейся в появлении избыточных количеств минерального азота в окружающей среде, и как следствие – в сельскохозяйственной продукции (Кореньков, 1976, 1999; Сапожников, 1976; Смирнов, 1977; Гамзиков, 1981; Помазкина, 1985; Кудеяров, 1989, 2000; Муравин, 1989; Минеев, 1990; Соколов, Семенов, 1992; Janson, 1958; Jenkinson, 1987).

Поэтому количественный учет динамики изменения азотного фонда необходим как для понимания процессов, происходящих в почве, так и для разработки практических мероприятий, направленных на оптимизацию азотного режима в агроэкосистемах, в процессе которого решается двудеяная задача повышения их биопродуктивности и сохранения экологически безопасной среды обитания.

**Цель и задачи исследований.** Целью исследований являлась агроэкологическая оценка современного состояния азотного фонда черноземных почв лесостепи Среднего Поволжья и разработка научных основ экологически-ориентированной системы его использования для обеспечения роста продуктивности и устойчивости земледелия

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи, каждая из которых имеет самостоятельное научное значение:

1. Дать агроэкологическую оценку современного состояния азотного фонда почв и его изменения в процессе сельскохозяйственного использования и различной интенсивности антропогенного воздействия.

2. Определить количественные параметры азотминерализующей способности почв как суммарной оценки трансформации азота под воздействием биотических и эдафических факторов.

3. Провести природоохранную количественную оценку комплексного использования технического, органического и биологического азота в агроценозах.

4. Изучить процессы миграции азота по профилю почв в зависимости от форм, доз, сроков и глубины внесения.

5. Разработать систему мер реабилитации деградированных черноземов за счет использования автогенных восстановительных сукцессий растительности – фитомелиорантов (многолетних бобовых трав), биомелиорантов (навоза, соломы, сидератов) и химической мелиорации, исключающих развитие негативных процессов при использовании азотных удобрений.

**Научная новизна.** Проведен системно-экологический анализ основных составляющих азотного фонда недонасыщенных черноземов, и разработана система показателей для оценки его в условиях правобережной лесостепи Среднего Поволжья. Установлены закономерности трансформации азота почвы в зависимости от различной интенсивности антропогенного воздействия.

Выявленные количественные параметры азотминерализующей способности почв в зависимости от подтиповых особенностей, реакции почвенной среды, использования агрохимических средств дают возможность корректировать дозы азотных удобрений под зерновые культуры, делая их более безопасными для окружающей среды.

Проведена количественная оценка баланса азота  $^{15}\text{N}$  и особенности его трансформации на черноземах с различной реакцией среды и степенью окультуренности в зависимости от доз, сроков, способов и форм применения азотных удобрений. Выявлены факторы образования «экстра»-азота и его потребления растениями при использовании различных средств химизации.

На основе выявленных взаимосвязей показателей азотного режима почвы и продуктивности сельскохозяйственных культур дана агроэкологическая и природоохранная оценка известкования черноземов и разработана модель, позволяющая выбрать для конкретных условий Поволжья эффективные и безопасные приемы использования и сочетания технического, биологического и органического азота.

Установлены экологические функции азотных удобрений: агрономическая и физиологическая их эффективность в зависимости от комплекса эдафических, абиотических и антропогенных факторов.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

агроэкологическая оценка азотного фонда черноземных почв лесостепи Среднего Поволжья и направленности его трансформации в зависимости от интенсивности агрогенного воздействия;

азотминерализующая способность и динамика накопления доступного азота как показатели прогноза обеспеченности им получения запланированного урожая культур в агроценозе;

количественная оценка статей баланса азота при различной реакции почвенной среды, дозах, сроках, способах и формах применения азотных удобрений, а также принципы регулирования участия азота почвы, удобрений и «экстра»-азота в формировании урожая и качества зерна пшеницы;

агроэкологическая концепция управления азотным режимом недонасыщенных черноземных почв и продуктивностью сельскохозяйственных культур путем известкования и системой других приемов антропогенного воздействия на почвенный покров.

#### **Практическая значимость и реализация результатов исследований.**

Установленные с использованием  $^{15}\text{N}$  закономерности трансформации азота удобрений в агросистеме позволяют на научной экологической основе совершенствовать приемы оптимизации азотного питания зерновых культур, повысить эффективность использования агрохимических средств и снизить опасность загрязнения ими окружающей среды.

Результаты изучения азотминерализующей способности почв дают возможность с достаточной точностью устанавливать величины доступного для растений азота в течение предстоящего вегетационного периода и прогнозировать потребность в азотных удобрениях под планируемый урожай яровой пшеницы.

Выявленные размеры и состав потерь азота из почвы в результате вымывания и газообразных потерь при различных условиях применения удобрений позволяют оценить влияние сельскохозяйственного загрязнения биосферы и прогнозировать пути его снижения.

В условиях ухудшения экологической ситуации, прогрессирующего подкисления черноземов известкование стабилизирует почвенное плодородие, улучшает реакцию среды и азотный режим за счет активизации процессов мобилизации почвенного азота, способствует повышению коэффициентов использования азота растениями и снижает размеры потерь. Это дает возможность снизить дозы азотных удобрений, необходимых для получения запланированных урожаев, улучшить состояние окружающей среды.

Предложенные рекомендации по известкованию черноземов в сочетании с использованием агрохимических средств используются при разработке нормативов расхода известковых материалов для оптимизации реакции почвенной среды.

Теоретические положения и результаты экспериментальных исследований нашли отражение в рекомендациях по различным аспектам применения известкования и других удобрений. Они включены в «Рекомендации по известкованию черноземных почв Пензенской области», «Краткий справочник агронома», а также в учебные пособия:

«Экологические факторы и их воздействие на организм» (гриф Министерства образования РФ);

«Землеведение», «Методы экологических исследований», «Почвенная биология», «Химия окружающей среды (с грифами Министерства сельского хозяйства РФ);

«Экологические проблемы геосферы», «Эколого-экономическая и энергетическая оценка агроэкосистем», «Основы радиоэкологии», «Практикум по экологии и химии окружающей среды» (с грифами УМО вузов РФ по агрономическому образованию).

Основные теоретические положения и практические результаты диссертационной работы используются при чтении специальных курсов в Пензенской ГСХА и Пензенском государственном педагогическом университете.

**Апробация работы.** Результаты научных исследований были доложены на 30-ти Международных, Всероссийских и региональных конференциях (1989-2003), в том числе на Международных конференциях Географической сети опытов с удобрениями ВИУА (1995, 1996, 1998, 2001, 2002), Почвенном институте им. В.В. Докучаева (1997, 1998, 2001); МГУ им. Ломоносова (1996, 1998); 2-ом и 3-ем съездах общества почвоведов России (Санкт-Петербург, 1996, Суздаль 2000); выездном заседании президиума РАЕН «Эколого-экономические проблемы лесостепных регионов» (Пенза, 1997).

**Публикации.** По результатам исследований опубликовано 120 научных работ объемом более 40 печатных листов, в т.ч. 2 монографии, 17 статей в центральных журналах и 36 в сборниках материалов.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 6 глав и выводов. Работа изложена на 263 страницах машинописного текста, содер-

жит 101 таблицу, 25 рисунков, 44 приложения. Список использованной литературы включает 470 наименований, в т.ч. 86 иностранных авторов.

Все научные положения диссертации разработаны лично автором. В решении отдельных вопросов в разное время принимали участие Ю.В. Корягин, С.М. Надежкин, Т.А. Власова, Г.Е. Гришин; некоторые экспериментальные данные получены совместно с К.К. Лазаревым, Е.Г. Сильновой, которым автор выражает искреннюю благодарность.

Особая признательность научному консультанту академику РАСХН В.Г. Минееву, профессорам А.Ф. Блинохватову, О.А. Соколову, Э.А. Муравину, И.А. Шильникову за методические советы и поддержку при подготовке диссертации.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Объектами изучения являлись автоморфные черноземы (оподзоленные, выщелоченные, типичные) различного гранулометрического состава Пензенской, правобережье Ульяновской, Самарской и Саратовской областей. Полевые опыты проводились в учхозе ПГСХА, хозяйствах Пензенской области и заповеднике «Приволжская лесостепь».

Основной фон почвенного покрова региона на 71% представлен черноземами – оподзоленными, выщелоченными, типичными и на 22% – серыми лесными почвами. Среди подтипов черноземов преобладают выщелоченные. Характерной особенностью черноземов центральной лесостепи Среднего Поволжья является недонасыщенность основаниями и значительная доля водорода в ППК. Наибольший процент кислых черноземов отмечается в Пензенской области. По мере подкисления уменьшается устойчивость агроэкосистем к антропогенному воздействию, что связано в первую очередь с потерей кальция из почвенно-поглощающего комплекса. При подкислении, меняется ход и направленность процессов трансформации азотсодержащих соединений почвы и обеспеченность растений азотным питанием.

Своеобразие лесостепного ландшафта обусловлено в значительной мере климатическими особенностями зоны: в летний период возрастает солнечная радиация, повышаются средние температуры, одновременно понижается количество атмосферных осадков. Осадки выпадают неравномерно: влажные годы и месяцы чередуются с засушливыми. Среднемноголетнее количество осадков составляет на юго-востоке зоны 350-400 мм, в северо-западных районах - 400-500 мм; больше всего их выпадает в июле месяце. Засухи и засухи наблюдаются достаточно часто (в среднем один раз в 3 года), что создает угрозу урожаям сельскохозяйственных культур. Продолжительность вегетационного периода составляет 145-170 дней, сумма активных температур - 2100-2400 °С, среднегодовая температура воздуха +1,0 +4,0°С. Гидротермический коэффициент за период вегетации в среднем колеблется от 0,8 до 1,1;

в засушливые годы в отдельные периоды он снижается до 0,4, а во влажные - увеличивается до 1,5-1,7.

За период исследований (1985-2002 гг.) достаточным увлажнением характеризовались четыре года (1989, 1990, 1993, 1994 гг.), умеренным - пять лет (1985, 1987, 1991, 1992, 1997 гг.), засушливым – шесть лет (1988, 1995, 1999- 2002), крайне засушливым – три года (1986, 1996, 1998 гг.).

### **Условия и методы проведения исследований**

Исследования проводились путем сравнительно-географического и сравнительно-аналитического методов, стационарных методов наблюдений в сочетании с моделированием в полевых и лабораторных условиях.

Для изучения азотного фонда использовались образцы почвы парных разрезов (целина, залежь - пашня), заложенных в период маршрутных экспедиций, стационарных наблюдений в заповеднике «Приволжская лесостепь». При заложении почвенных разрезов использован принцип единственного различия (почвы различались только способом использования).

Для оценки современного состояния физико-химических свойств черноземов проанализированы результаты массовых обследований почв института «Волгогипрозем» и других научных и учебных учреждений региона. На основании этого сформирована выборка из 1028 объектов.

Изучение изменений азотного фонда черноземов и его составляющих под действием антропогенного воздействия проводилось в многолетнем (с 1980 г.) стационарном опыте с разными системами и дозами удобрений ( $N_0P_0K_0$ ;  $N_{48}P_{47}K_{51}$ ;  $N_{83}P_{78}K_{84}$ ;  $N_{114}P_{111}K_{117}$ ) на двух фонах навоза (5 и 10 т/га севооборотной пашни) в зернопаропашном севообороте.

Выяснение экологической роли разных видов органических удобрений проводилось в стационарном полевом опыте. Схема его  $(2 \times 7) \times 3$  со следующими факторами и градациями: А – минеральные удобрения: ( $N_0P_0K_0$  и  $N_{60}P_{90}K_{60}$ ); В – органические удобрения (1- без удобрений; 2 – навоз 50 т/га; 3 – солома 5 т/га; 4 – редька масличная (*Raphanus sativus*); 5 – донник белый однолетний (*Melilotus albus*); 6 – редька + солома; 7 – донник + солома).

Для определения роли известкования в изменении свойств кислых черноземов и продуктивности сельскохозяйственных культур изучали закономерности действия и взаимодействия доломитовой муки и минеральных удобрений в полевых опытах, проводившихся по схеме  $(6 \times 4) \times 3$ , которая предусматривала изучение 6 доз доломитовой муки (в долях г.к. 0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 и 2,5) и четырех уровней минерального питания ( $N_0P_0K_0$ ;  $N_{30-44}P_{30-37}K_{30-37}$ ;  $N_{60-88}P_{60-74}K_{60-74}$ ;  $N_{90-132}P_{90-111}K_{90-111}$ ). Опыты были заложены в трех почвенно-климатических зонах Пензенской области на черноземах: выщелоченном и оподзоленном (тяжело- и среднесуглинистом).

Изучение основных приемов управления плодородием почв – севооборотов, известкования и систем удобрения с использованием сидератов – проводилось в стационарном опыте  $(3 \times 2 \times 9) \times 4$  со следующими факторами и градациями: А – севообороты: 1– зернопаропашной; 2– зернопропашной; 3 – зернотравянопропашной; Б – известкование: 1– без извести (контроль) , 2 –



известкование по 1,0 Нг; В – системы удобрений: 1 – биологическая нулевая (контроль), 2 – органическая, 3 – минеральная минимальная, 4 – органо-минеральная минимальная, 5 – органо-минеральная минимальная с пожнивной сидерацией, 6 – минеральная интенсивная, 7 – органо-минеральная интенсивная.

Все опыты в учхозе ПГСХА проводились на черноземе выщелоченном среднемоющем среднегумусном тяжелосуглинистом на покровном карбонатном суглинке, имеющем в пахотном слое следующие исходные агрохимические показатели:  $pH_{kcl}$  – 4,35-5,2;  $N_T$  – 5,8-11,3 мг-экв/100 г почвы; S – 26,2-33,8 мг-экв; V – 74,1-80,8%; содержание гумуса (по Тюрину) 6,02-6,80%; общего азота – 0,349-0,402%; подвижного фосфора 53-108 мг и обменного калия (по Чирикову) 92-146 мг/кг почвы.

Приемы оптимизации использования азотных удобрений (формы, сроки, дозы и способы внесения удобрений) изучались в краткосрочных опытах.

Трансформация азота удобрений и почвы (определение «экстра»-азота, процессов минерализации-иммобилизации, нетто-минерализации, потерь азота, ассоциативной фиксации азота) проводилось в микрополевых и вегетационных опытах с использованием индикаторно-изотопного метода с применением  $^{15}N$  в составе  $NH_4NO_3$  (20,26; 23,80; 24,52 и 31,18 ат%),  $(NH_4)_2SO_4$  (49,34; 50,12 и 92,00 ат.%), зеленой массы донника и соломы (с избытком 26,08–35,64 ат%), микробной биомассы (28,13 ат%).

Определение влияния уровня pH на биологические, физико-химические свойства, азотный фонд, продуктивность и качество зерна 6 сортов яровой мягкой пшеницы, величину ассоциативной азотфиксации проводилось в модельном микрополевом опыте. Уровни  $pH_{kcl}$  от 4,5 до 7,5 с интервалом 0,5 ед. были созданы путем внесения в почву HCl и  $CaCO_3$ .

Исследование состава, свойств почв (агрохимических, физических, биологических и энзиматических) и режимные наблюдения проводили общепринятыми методами. При применении удобрений, меченых  $^{15}N$ , выделение азота проводили дистилляционным методом по Къельдалю-Йодльбауэру с анализом изотопного состава масс-спектрометрическим методом. В составе легкоразлагаемого органического вещества ЛОВ выделялся по Ганжаре с соавторами (1987), азот – по Къельдалю.

«Экстра»-азот вычисляли по Семенову (1999): 1 – по разнице выноса азота растениями на вариантах NPK и РК (ЭАр); 2 – по разнице сумм выноса почвенного азота растениями и содержащегося в почве  $^{14}N_{мин.}$  (ЭАб); 3 – по разнице величин нетто-минерализации азота почвы на вариантах NPK и РК (ЭАн). Величину нетто-минерализации рассчитывали по Кудеярову (1989)  $^{14}N_{нетто-мин.} = (N_{мин. в почве} + N_{в растениях} + N_{потери} + ^{15}N_{иммобилизованный}) - (N_{в семенах} + N_{мин. первоначально присутствовавший в почве} + N_{доза удобрения})$ .

Количество фиксированного азота из атмосферы определяли: по разнице между инокулированными и неинокулированными вариантами (Завалин и др., 1997):  $N_{биол.} = N_{общ.} - (N_{уд.} + N_{почв.} + N_{экс.})$ , где:  $N_{биол.}$  – количество фиксированного азота;  $N_{общ.}$  – общий вынос азота растениями;  $N_{уд.}$  – вынос азота

удобрений;  $N_{\text{почв.}}$  – вынос азота почвы;  $N_{\text{экс.}}$  – количество «экстра»-азота в урожае.

Азотминерализующую способность почв определяли по Стенфорду-Смиту (1972) и Башкину-Кудеярову (1987).

Полевые и мелкоделяночные опыты закладывали по методикам ВИУА и ЦИНАО; статистическую обработку проводили по методикам в изложении Б.А. Доспехова (1985) и В.Н. Перегудова. (1968) с использованием пакетов прикладных статистических программ Statistika и Statgrafics.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

### **АГРОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ АЗОТНОГО ФОНДА ЧЕРНОЗЕМНЫХ ПОЧВ**

Вопрос о природе и запасах почвенного азота подробно рассмотрен в ряде крупных работ (Тюрин, 1937; Кононова, 1956; Адерихин, Щербаков, 1970; Кук, 1973; Кореньков, 1976; Славнина, 1978; Колоскова, 1979; Гамзиков, 1981; Bremner, 1965 и др.).

Вместе с тем, региональные абиотические условия почвообразования накладывают отпечаток на количественный и качественный состав азотсодержащих соединений в почвах. Для черноземов естественных ценозов лесостепи Приволжской возвышенности характерно большее содержание азота по сравнению с аналогичными почвами ЦЧО и Западной Сибири (Щербаков, 1968; Гамзиков, 1981).

В среднем, в верхнем слое этих почв содержание общего азота составляет: в выщелоченных 0,419% (с колебаниями от 0,312 до 0,543%), оподзоленных 0,275 (0,239-0,313) и в типичных – 0,424% (0,372-0,434%) (табл. 1). Длительное экстенсивное использование черноземов привело к значительному снижению содержания и запасов гумуса и азота.

#### ***Азот органических соединений***

Основная часть азота в черноземах лесостепи Среднего Поволжья сосредоточена в специфических гумусовых веществах (около 90% от общего количества). Это несколько больше, чем черноземах Татарии (Винокуров, Алпатьева, 1948) или ЦЧО (Адерихин, Щербаков, 1974), но несколько меньше, чем в черноземах Предуралья (Хазиев, 1982; Хабиров, 1993) или Западной Сибири (Гамзиков, 1981).

Остальной органический азот представлен неспецифическими соединениями (аминокислотами, аминами, моноамидами и др.). Сюда же включается азот легкоразлагаемого органического вещества. Количество азота неспецифических органических веществ в изучаемых почвах невелико (5,0-5,2%). На долю легкоразлагаемого органического вещества типа детрита приходится 3,4-4,3% от общего азота почвы.

Отличительной особенностью черноземов Поволжья является невысокое содержание азотистых соединений в первой фракции гуминовых кислот

(4,5-6,7%). Во всех изученных почвах основная часть азота гумуса (60-72% от суммарного содержания в этой группе) представлена соединениями фракции 2 гуминовых кислот, предположительно связанных с кальцием.

Таблица 1

Содержание углерода и общего азота в черноземах центральной лесостепи Приволжской возвышенности

Показатель			Подтип чернозема		
			оподзоленный, n=28	выщелочен- ный, n=42	типичный, n=21
Содер- жание в слое 0-20 см, %	C		4,63±0,57 (1)	6,50±0,68	6,06±0,62
			3,22±0,29 (2)	5,20±0,43	4,96±0,41
	N		0,393±0,043 (1)	0,524±0,048	0,518±0,041
			0,275±0,037 (2)	0,419±0,028	0,424±0,031
C:N в слое 0-20 см			11,7±0,8	12,4±1,0	11,7±0,8
Запасы, т/га в слое см	0-20	C	77±6,5	116±9,5	114±9,0
		N	6,1±0,7	9,5±1,1	9,7±0,8
	0-50	C	156±13,7	245±23,8	238±18,5
		N	14,4±1,2	22,1±2,1	22,1±2,0
	0-100	C	223±14,2	345±19,3	356±17,7
		N	22,5±1,9	35,3±2,2	36,6±2,6

Примечание: 1 – целина, 2 – пашня

Использование в опытах удобрений и микробной биомассы, меченных  $^{15}\text{N}$ , позволило проследить за направленностью процесса иммобилизации азота и количественно определить величину его закрепления в составе гумусовых соединений. Установлено, что влияние азота удобрений на иммобилизационно-мобилизационные процессы определяется характером использования почв, видом удобрения и погодными условиями.

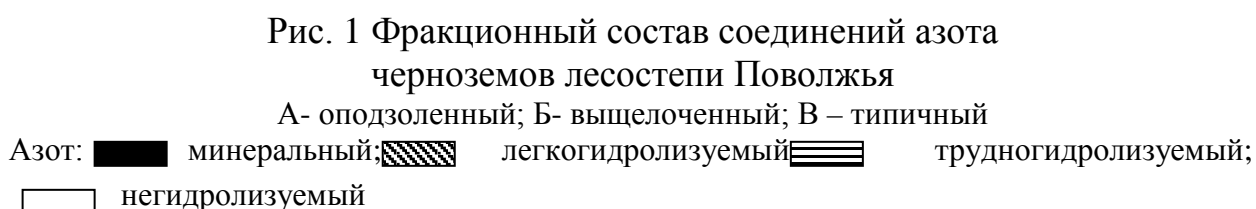
В пахотном черноземе закрепление азота микробной биомассы в органическом веществе меньше, чем в целинном аналоге. Первоначальное закрепление внесенного азота происходило в наиболее простых по своему строению органических соединениях. Но уже к концу первого года иммобилизованный азот обнаруживался во всех группах и фракциях органического вещества. При этом относительное содержание  $^{15}\text{N}$  в подвижных фракциях гумусовых кислот (ГК-1, ФК-1а и ФК-1) целинного чернозема было большим, чем в пахотном. Сам факт обнаружения  $^{15}\text{N}$  во всех фракциях гумусовых соединений свидетельствует о высокой скорости процесса закрепления и направленности его в сторону образования более сложных соединений.

В зависимости от вида удобрений абсолютное и относительное содержание иммобилизованного азота было различным. Наибольшее количество азота зеленой массы бобового сидерата закреплялось во фракциях ГК-1 и ФК-1, соломы - во фракциях ГК-2 и ФК-2. В первый год в состав подвижных

форм органического вещества включалось в 1,5-4,0 раза больше внесенного  $^{15}\text{N}$  по сравнению с его немечеными формами. После уборки первой культуры 9-38% внесенного азота было обнаружено в составе легкоразлагаемого органического вещества ( $\text{N}_{\text{ЛОВ}}$ ) и 8-42% в лабильных гумусовых кислотах ( $\text{N}_{\text{ЛГК}}$ ).

К концу четвертого года содержание меченого азота уменьшалось, а его количество во фракциях и группах гумуса изменялось. Максимальное снижение отмечено в группе фульвокислот, что подтверждает большую степень подвижности иммобилизованного азота в этой группе органического вещества почвы, минимальное – в группе гуминов. По-видимому, уменьшение содержания иммобилизованного азота во фракциях и группах гумуса обусловлено рядом факторов: использованием его растениями, минерализационными потерями, а также сближением процессов трансформации вновь внесенного азота с процессами трансформации природного азота почвы.

В исследуемых почвах большая часть органического азота представлена негидролизуемыми и трудногидролизуемыми соединениями (88,5-9,05 %). Наиболее высокое содержание азота этих фракций отмечается в типичных черноземах, далее идут выщелоченные и оподзоленные (рис. 1).



Это позволяет заключить, что азот органического вещества черноземов лесостепи дифференцирован по устойчивости к гидролизу, что определяет региональные особенности их к высвобождению минерального азота.

#### ***Минеральные формы азота в черноземах лесостепного Поволжья***

К настоящему времени имеется достаточно обширная информация о содержании, запасах и режиме минерального азота в почвах лесостепного Среднего Поволжья (Николаева, 1965; Лебедева, 1973; Власова, 1999; Сатаров, 1999).

Минеральный азот в почвах представлен в основном аммонием, нитратами и нитритами. Количество его в пахотном слое изучаемых почв составляет в среднем 2-7 % от общего азота. Запасы минерального азота возрастают в ряду черноземов: оподзоленные – выщелоченные – типичные и достигают

соответственно 120-163-164 кг/га. Более 80% от суммы минеральных соединений азота составляет необменный аммоний.

В пределах метрового профиля отношение нитратного азота и обменного аммония меняется: в верхнем 0-20 см слое оно составляет 1,7-2,3, вниз по профилю уменьшается до 0,1-0,2.

Из общего количества доступных форм азота, заключенного в метровой толще, в слое 0-20 см сосредоточено 35,7-44,5% азота.

### ***Влияние реакции среды на азотный фонд черноземов***

Антропогенное воздействие на черноземы, выразившееся в декальцинации и ускоренном развитии подкисления почв, прослеживается при сопоставлении материалов массовых обследований черноземных регионов. Так в ЦЧЗ площадь выщелоченных и оподзоленных черноземных почв с кислотной реакцией увеличилось на 13,8 % (Щербаков, Васенев, 1996; Шильников, Богомазов, Ивойлов, 1998). Наиболее существенные антропогенные изменения за 30 последних лет произошли в почвах Пензенской области.

По данным ГЦАС «Пензенский» за период с 1970 по 2000 гг. в черноземах выщелоченных содержание обменных оснований снизилось с 33,94 мэкв до 30,47 мэкв, показатель  $pH_{KCl}$  уменьшился с 5,2 до 4,9 (Гришин, 2001). Площади почв с  $pH_{KCl}$  до 5,6 составляют 93,1%, с  $pH_{KCl}$  до 5,1 – 46,4% площади пашни. В настоящее время более половины пахотных почв Пензенской области обладают сильно- и среднекислой реакцией среды.

С изменением реакции почвенной среды меняется направленность процесса минерализации азотсодержащих органических соединений. С увеличением уровня  $pH_{KCl}$  содержание минерального азота и азота легкогидролизуемой фракции повышалось при соответствующем снижении количества его негидролизуемых форм (табл. 2).

Накопление обменного аммония и нитратного азота при изменении реакции среды происходило по-разному. С ростом кислотности (от  $pH_{KCl}$  7,5 до 4,5) содержание  $N-NO_3$  снижалось с 13,4 до 1,88 мг/кг почвы, а  $N-NH_4$  – увеличивалось с 3,8 до 13,2 мг/кг.

В кислой почве активизация процесса аммонификации происходила за счет грибов и актиномицетов, в то время как число бактерий снижалось. Особенно сильно при этом страдали нитрифицирующие микроорганизмы. Число нитрификаторов при  $pH$  снизилось более чем в 7 раз по сравнению с нейтральной средой. При этом количество аммонийного азота увеличилось в 1,8 раза к исходному уровню ( $pH$  5,15).

Нитрифицирующие микроорганизмы сильно реагировали на изменение кислотности почвы. В интервале  $pH$  5,0-6,0 количество их выросло в 2,3 раза, а  $N-NO_3^-$  – в 2,5 раза, в интервале 6,0-7,0 – в 2,2 и 5,4 раза соответственно.

Наибольшая активность протеазы отмечена при  $pH$  6,5, уреазы - при 7,0. При росте как кислотности, так и щелочности почвы активность протеазы снижалась в 2,12-2,5 раза, уреазы - в 1,17-2,2 раза по сравнению с  $pH$  6,5, где активность ферментов была наиболее высокой.

Таблица 2

Влияние реакции среды на азотный фонд чернозема выщелоченного через 5 лет после закладки опыта.

Показатели азотного фонда	pH <sub>kcl</sub>				
	исходный	4,5	5,5	6,5	7,5
N <sub>общ.</sub>	<u>3392</u> 100	<u>3321</u> 100	<u>3320</u> 100	<u>3318</u> 100	<u>3319</u> 100
N-NO <sub>3</sub> + N-NH <sub>4</sub>	<u>37</u> 1,1	<u>26</u> 0,8	<u>30</u> 0,9	<u>39</u> 1,2	<u>46</u> 1,4
N-NH <sub>4</sub> фиксированный	<u>142</u> 4,2	<u>143</u> 4,3	<u>139</u> 4,2	<u>133</u> 4,0	<u>133</u> 4,0
N <sub>органич.</sub> всего	<u>3219</u> 94,9	<u>3158</u> 95,1	<u>3157</u> 95,1	<u>3152</u> 95,0	<u>3146</u> 94,8
в т.ч неспецифических органических веществ	<u>176</u> 5,2	<u>167</u> 5,3	<u>173</u> 5,2	<u>172</u> 5,2	<u>169</u> 5,1
из них ЛОВ	<u>146</u> 4,3	<u>139</u> 4,2	<u>139</u> 4,2	<u>143</u> 4,3	<u>146</u> 4,4
N гумуса	<u>3043</u> 89,7	<u>2982</u> 89,8	<u>2985</u> 89,9	<u>2980</u> 89,8	<u>2977</u> 89,7
N легкогидролизуемый	<u>285</u> 8,4	<u>249</u> 7,5	<u>289</u> 8,7	<u>352</u> 10,6	<u>395</u> 11,9
N трудногидролизуемый	<u>553</u> 16,3	<u>538</u> 16,2	<u>548</u> 16,5	<u>574</u> 17,3	<u>591</u> 17,8
N негидролизуемый	<u>2374</u> 70,0	<u>2364</u> 71,2	<u>2314</u> 69,7	<u>2220</u> 66,9	<u>2154</u> 64,9

Примечание: числитель – мг/кг почвы, знаменатель - % от общего азота

Выявлена средняя зависимость между показателями pH<sub>kcl</sub>, гидролитической кислотности и содержанием нитратного азота ( $r = -0,52; +0,56$ ).

Полученные данные позволяют заключить, что для активизации процессов трансформации азотсодержащих соединений в кислых черноземах необходимо регулирование реакции среды с целью обеспечения сельскохозяйственных культур минеральным азотом, и в первую очередь нитратным, за счет почвенных запасов.

### ***Влияние удобрений на азотный фонд***

Под влиянием длительного применения различных систем удобрения удалось выявить основные изменения в азотном фонде чернозема выщелоченного. Применение минеральных удобрений приводило к достоверному росту абсолютного и относительного содержания минеральных форм азота. При внесении органических удобрений содержание минерального азота увеличивалось только в пахотном слое, а использование минеральных удобрений способствовало накоплению их и в нижней части профиля.

Увеличение содержания минерального азота в удобренной почве связано не только с внесением удобрений, но и трансформацией органического

азота почвы. Об этом свидетельствует снижение абсолютного и относительного содержания легко- и трудногидролизуемых форм и увеличение негидролизуемого азота в верхнем полуметровом слое удобренной почвы по сравнению с контролем.

Азотный фонд черноземов центральной части лесостепи Среднего Поволжья сложен и представлен различными по составу и свойствам соединениями (рис. 2).

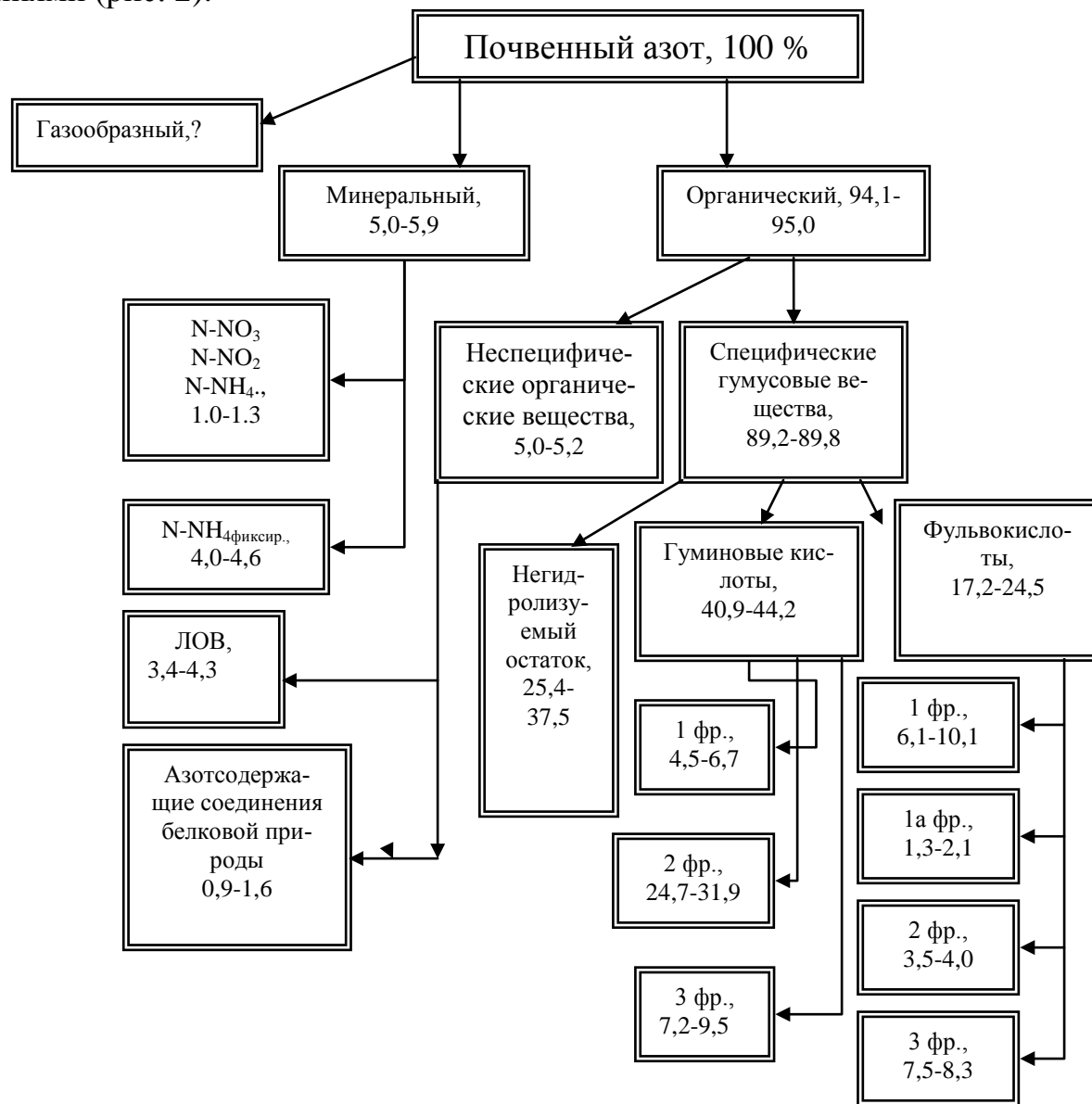


Рис. 2. Состав азотного фонда черноземов лесостепи Среднего Поволжья

### *Минеральный азот в диагностике азотного питания*

Количественное определение доступных азотсодержащих соединений может быть одним из критериев расчета оптимальной дозы удобрений, необходимой для получения запланированного урожая. Для диагностики азотного режима почв в разных природных зонах используются как нитратные, так и

аммонийные формы минерального азота присутствующие в почве на момент отбора проб на анализ.

Особенностью почвенной диагностики азотного питания является информация о доступности растениям нитратного и аммонийного азота из разных глубин почвенного профиля.

Для выяснения возможности использования минерального азота ( $\text{N-NO}_3^- + \text{N-NH}_4^+$ ) в диагностических целях в модельном полевом опыте, проведенном на черноземе выщелоченном тяжелосуглинистом учхоза Пензенского СХИ, были созданы разные уровни содержания доступного растениям азота внесением сульфата аммония в дозах 20, 40, 60 и 80 кг/га на фоне  $\text{P}_{60}\text{K}_{60}$  осенью под вспашку.

Азот, внесенный с осени в пахотный слой, увеличивал запасы  $\text{N-NO}_3^- + \text{N-NH}_4^+$ . Так при дозе 20 кг/га количество минерального азота в слое 0-100 см возросло на 11%, при 40 кг – на 41,6%, а при 80 кг/га – в два раза. В основном этот азот был сосредоточен в слое 0-60 см (на 83–89%). Эти данные свидетельствуют о некоторой миграции азота по профилю.

При сопоставлении данных по содержанию минерального азота с продуктивностью яровой пшеницы выявлена сильная зависимость ее урожая от количества нитратной формы азота в слое 0-60 см ( $r=0,859 \pm 0,067$ ) и суммы нитратного и аммонийного азота ( $r=0,921 \pm 0,079$ ). Более слабой эта связь оказалась с обменно-поглощенным аммонием ( $r=0,637 \pm 0,057$ ).

Для выяснения роли азота различных горизонтов почвенного профиля в продукционном процессе яровой пшеницы нами проведены специальные исследования, в которых  $^{15}(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  вносили на глубину 10, 30, 60 и 90 см в два срока – осенью и весной.

Степень использования азота из разных слоев черноземной почвы менялась в течение периода вегетации пшеницы. В первые фазы роста потребление азота шло, в основном, из слоя 0-30 см. В среднем за три года к периоду кущения растения пшеницы использовали 50,1–57,1%  $^{15}\text{N}$  сульфата аммония, внесенного на глубину 10 см и 33,9–46,1 – на глубину 30 см (рис. 4).

В период колошения – полной спелости зерна увеличивалось потребление азота из нижних горизонтов почвы, однако использование его было существенно меньшим, чем из слоя 0–60 см. Наибольшее потребление азота растениями яровой пшеницы происходило с глубины 30 (60) см. Наиболее полное использование минерального азота из пахотного слоя связано с тем, что основная масса корней сосредоточена в слое 30–60 см. При размещении азота удобрений глубже 60 см его доступность растениям снижалась (рис 3).

В среднем за 3 года наибольшее потребление азота растениями яровой пшеницы происходило при заделке  $^{15}(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  на глубину 30 см. Меньший вынос  $^{15}\text{N}$  с глубины 10 см обусловлен тем, что в период интенсивного потребления его (фазы выход в трубку – колошение) верхний слой почвы пересыхал.

Установленные закономерности следует учитывать при отборе образцов для диагностических целей.



### Диагностика минерализуемого фонда азота черноземных почв

Для прогнозирования обеспеченности растений азотом наиболее целесообразно определение азотминерализующей способности, которая характеризует количество органического азота почвы, способного к минерализации в течение прогнозируемого вегетационного периода и включает в себя азот, поглощаемый растениями, реиммобилизуемый микроорганизмами, теряемый при вымывании и денитрификации, а также остающийся в доступной форме после окончания периода вегетации (Башкин, Кудеяров, 1985; Хабиров, 1993; Исмаилов Stanford, Smith, 1972; Nafe et al., 1983; Campbell et al., 1995; Christenson, 1997; He et al., 2000).

Стенфорд и Смит (1972) считают, что доступный для минерализации фонд азотсодержащих соединений почвы (потенциал минерализации почвенного азота,  $N_0$ ) однороден в течение всего периода вегетации и процесс минерализации подчиняется кинетике первого порядка и описывается уравнением  $dN/dt=kN$ , где  $N = N_0 - N_t$  – содержание потенциально минерализуемого азота в конце интервала времени  $t$ ;  $k$  – константа скорости минерализации – доля  $N_0$ , минерализуемая в единицу времени. Вместе с тем при определении азотминерализующей способности этим методом не учитывается воздействие удобрений на минерализационные процессы.

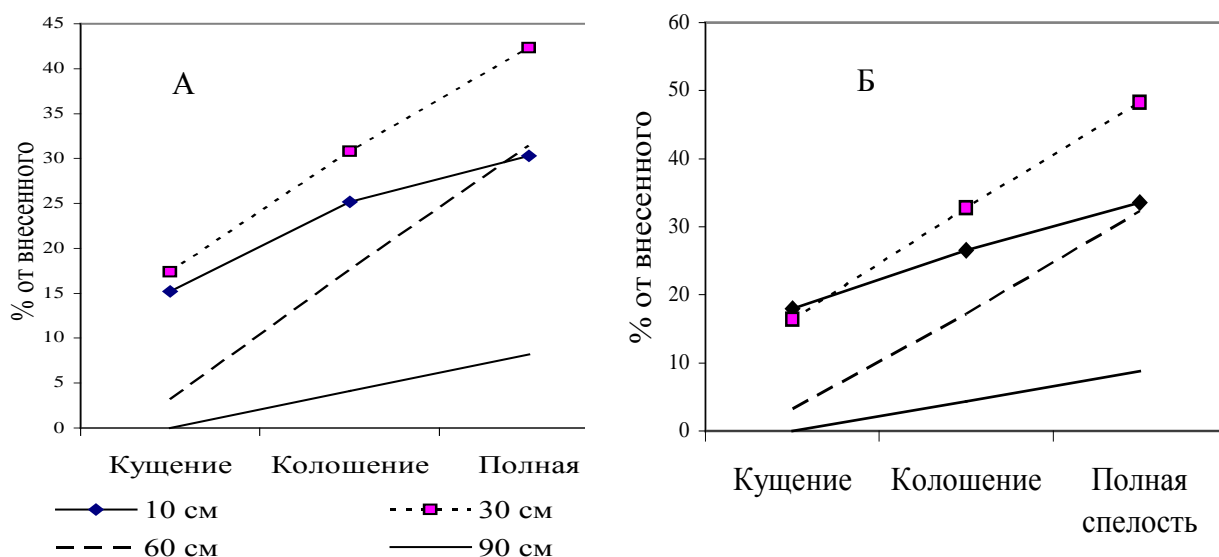


Рис. 3. Динамика использования азота яровой пшеницей в зависимости от глубины осеннего внесения  $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , среднее за 1986-1988 гг., % от внесенного, фон: А – PK, Б – NPK

Для оценки учета воздействия вносимых удобрений на процесс минерализации был разработан метод определения минерализуемого азота, эквивалентного азоту удобрений при компостировании образцов почвы с возрастающими дозами азотных удобрений. При определении этой величины дается оценка потенциально доступного азота почвенного фонда, способного к минерализации в течение прогнозируемого вегетационного периода (Башкин,

Кудеяров, 1985)

Изучение азотминерализующей способности черноземных почв лесостепи Поволжья показало, что накопление азота зависело как от подтиповых особенностей почв, так и от характера их использования.

Наибольшим накоплением доступного азота характеризовался целинный чернозем выщелоченный, в котором за 8 недель компостирования образовывалось 305,2 мг/кг минерального азота, в типичном – 301,3 и оподзоленном – 278,2 мг/кг почвы (рис. 4).

В старопахотных почвах величины накопления азота были на 30,1–48,1% меньшими по сравнению с целинными аналогами.

Для расчета величин  $N_0$  использовались данные по накоплению азота за период с третьей по восьмую неделю.

Наибольшее содержание минерализуемых соединений отмечалось в целинных почвах. Оценка пула минерализуемого азота, определенного по потенциалу минерализации, показала, что снижение  $N_0$  по сравнению с целинными аналогами в старопахотных почвах достигает 53–61% (по Стенфорду-Смиту) и АМС – 55,9–50,9% (по Башкину-Кудеярову).

Основная причина снижения величины  $N_0$ , вероятно, связана с уменьшением количества лабильных, быстрее и полнее минерализующихся компонентов азотного фонда почв: распашка почв приводила к снижению содержания N и C ЛОВ в оподзоленных – в 3,2–3,8 раза, выщелоченных – 2,8–3,1 и типичных – 2,7–3,2 раза по сравнению с почвами биоценозов.

Изучение влияния величины  $pH_{KCl}$  на азотминерализующую способность почв было проведено в лабораторном и микрополевом опытах на черноземе выщелоченном тяжелосуглинистом. Определение количественных показателей  $N_0$  и констант скорости (k) минерализации азота в зависимости от уровня pH выявило их значительную вариабельность. Количество потенциально минерализуемого азота ( $N_0$ ) увеличивалось с повышением показателя  $pH_{KCl}$  с 4,5 до 7,5 в 4,7 раза. При этом наибольшее накопление его происходило в интервале  $pH_{KCl}$  с 5,0 до 6,5 – 169–299 мг/кг почвы (табл. 3).

Скорость реакции минерализации органического азота колебалась от 3 до 14,1 мг/кг за одну неделю. При pH 4,5–5,5 она составила 3,8 мг, с повышением pH с 5,5 до 7,5 – на 9,4 мг/кг нед<sup>-1</sup>. Следует заметить, что эти данные получены при оптимальной температуре и увлажненности почвы. В полевых условиях константы скорости минерализации будут несколько меньшими даже при оптимальном уровне кислотности почвы, что обусловлено колебаниями гидротермических показателей в течение вегетационного периода.

Азотминерализующая способность с изменением величины  $pH_{KCl}$  чернозема менялась. За вегетационный период (май–август) она увеличивалась с 78 кг/га при pH 4,5 до 188 кг/га при pH 7,0. При дальнейшем повышении pH происходило некоторое затормаживание процесса минерализации.

Наибольшая величина АМС была за три года исследований получена при  $pH_{KCl}$  равном 7,0. При изменении уровня pH на 0,1 единиц азотминерализующая способность изменялась на  $2,2 \pm 0,6\%$ .

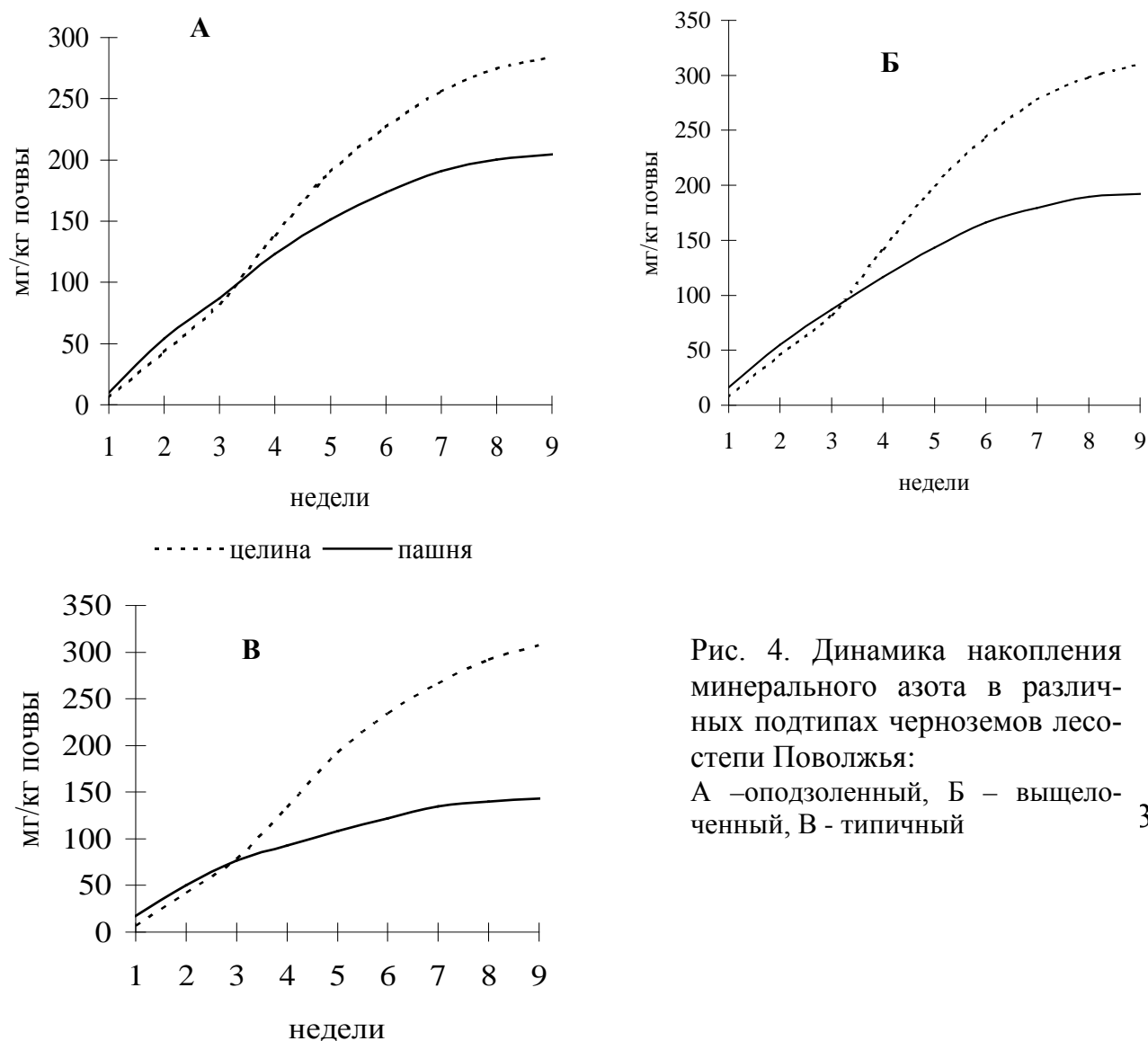


Рис. 4. Динамика накопления минерального азота в различных подтипах черноземов лесостепи Поволжья:

А – оподзоленный, Б – выщелоченный, В – типичный

3

Пользуясь полученными данными и поправочным коэффициентом, можно с достаточной вероятностью прогнозировать накопление минерального азота в черноземе выщелоченном за вегетационный период с учетом реакции почвы и гидротермических условий конкретного региона, что позволит корректировать дозы внесения азотных удобрений под полевые культуры. Например, при  $pH_{kcl} 5,0$  за 14 дней может быть высвобождено из органических азотсодержащих соединений в доступной форме 22 кг/га азота, а при  $pH 7,0$  – 76 кг/га.

Величины азотминерализующей способности почвы, согласно методу Башкина, примерно на 12% меньше, чем по методу Стенфорда-Смита, т. к. в первом случае дается оценка актуальной азотминерализующей способности, которая может иметь место в течение ближайших прогнозируемых вегетационных периодов, во втором – определяется вообще весь потенциально минерализуемый азот.

Сравнение разных способов оценки обеспеченности растений доступ-

ным азотом, проведенное в полевом опыте, позволило выявить, что количество азота почвы, минерализуемое в течение вегетации и рассчитанное по выносу  $^{15}\text{N}$  урожаем яровой пшеницы (зерно + солома) с учетом коэффициентов использования азота (для засушливых условий  $25,4 + 2,5\%$ , оптимальных –  $50,7 \pm 3,9\%$ ), составляло 155-288 кг/га (табл. 4).

Таблица 3

Влияние уровня  $\text{pH}_{\text{kcl}}$  на количество потенциально минерализуемого азота

Показатель	$\text{pH}_{\text{kcl}}$						
	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5
метод Стенфорда-Смита							
Количество потенциально минерализуемого азота ( $\text{N}_0$ ), мг/кг почвы	78	108	169	193	299	326	370
Период полураспада $\text{N}_0$ , недель	18,5	20,6	25,1	23,2	21,3	18,0	18,5
Константа скорости минерализации (k), $\text{нед}^{-1}$	0,038	0,034	0,028	0,049	0,033	0,039	0,038
Минерализуемый азот за одну неделю, мг/кг	3,0	3,7	4,7	7,5	9,9	12,7	14,1
метод Башкина-Кудеярова							
АМС, кг/га	78	96	131	139	160	188	173
N минерализуемый за май-август, кг/га	156	192	262	278	370	376	346

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что величины высвобождения азота в течение вегетационного периода в черноземной почве, определенные разными методами, были близки. Разница между величинами минерализуемого азота составляет 13-16%.

Указанные выше методы (по выносу  $^{15}\text{N}$ , Стенфорда – Смита, Башкина – Кудеярова) дают возможность с достаточно высокой точностью прогнозировать процессы минерализации органического азота при периодически – промывном водном режиме черноземов центральной лесостепи Приволжской возвышенности.

## ЭКОЛОГО-АГРОХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЗОТНЫХ УДОБРЕНИЙ

### *Использование растениями азота удобрений*

Важным показателем эффективности азотных удобрений является степень усвоения культурами внесенного азота. Исследованиями, проведенными в опытах на черноземе выщелоченном Пензенской области с использованием меченых  $^{15}\text{N}$  аммиачной селитры и сульфата аммония, установлено, что

эффективность действия азота удобрений, оцениваемая по степени его использования растениями яровой пшеницы, зависит от реакции среды, доз удобрений, его форм, сроков и глубины внесения, предварительной плодородности почвы и определяется складывающимися погодными условиями.

Обобщение экспериментальных данных вегетационных и микрополевых опытов позволило установить, что в зависимости от реакции чернозема растения яровой пшеницы использовали от 41,9% до 54,3% азота удобрения в оптимальных условиях и 22,5–30,9% – в полевых (табл. 5).

Зависимость между показателями  $pH_{kcl}$  и выносом азота из удобрения выражалась следующими уравнениями регрессии:

$$I_{Ny} = 15,1 - 4,97pH + 5,60pH^2 \quad r^2 = 0,745$$

$$I_{Ny} = 3,2 + 3,1pH + 8,84pH^{0,5} \quad r^2 = 0,417$$

где  $I_{Ny}$  – использовано азота удобрения, % от внесенного.

Таблица 4

Величины минерализуемого азота чернозема выщелоченного при выращивании яровой пшеницы сорта Харьковская 2.

Варианты	Урожайность сухой массы, т/га	Вынос урожаяем N почвы, кг/га (А)	Запасы N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + N –NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> перед посевом пшеницы, кг/га (Б)	(N <sub>0</sub> ) кг/га (В)	АМС, кг/га (С)	Сумма (Σ), кг/га		Разность, кг/га	
						Б + В	Б + С	A - Σ <sub>1</sub> (Б +В)	A- Σ <sub>2</sub> (Б+С)
1987 г.									
N <sub>0</sub>	5,72	155	42	144	128	186	170	-31	-15
N <sub>20</sub>	6,14	172	43	163	142	206	185	-34	-13
N <sub>40</sub>	6,92	210	63	167	152	230	215	-20	-5
N <sub>60</sub>	7,88	252	93	195	152	288	245	-36	7
N <sub>80</sub>	8,55	288	108	198	170	306	278	-18	10
1988 г.									
N <sub>0</sub>	3,85	188	29	202	180	231	209	-43	-21
N <sub>20</sub>	4,37	216	37	221	195	258	232	-42	-16
N <sub>40</sub>	4,76	248	41	247	216	288	257	-40	-9
N <sub>60</sub>	5,32	288	63	249	223	312	286	-24	2
N <sub>80</sub>	5,43	312	84	257	220	341	224	-29	8

При недостатке влаги в период активного роста пшеницы коэффициент использования азота удобрений (КИУ) не превышал 16,6–27,9%, а при достаточном увлажнении – увеличивался до 34,2–43,5% от внесенного количества (табл. 6). При этом на кислых черноземах коэффициент использования азота в благоприятные годы выше, чем в сухие в 2,06 раза, на среднекислых – в 1,86 и на нейтральных – в 1,46 раза, т. е. неблагоприятное действие засухи на

величину использования азота удобрений можно в определенной мере устранить применением известкования.

Таблица 5

Использование азота удобрений на черноземе выщелоченном разного уровня  $pH_{kcl}$  % от внесенного

Уровень $pH_{kcl}$	Использовано растениями		
	Минимум	Максимум	$M \pm m$
Вегетационные опыты, среднее по дозам 5-10 мг/100 г почвы ( $n = 36$ )			
<5,0 (15)	28,8	55,7	41,9 $\pm$ 3,5
5,01-5,50 (12)	22,4	55,6	41,8 $\pm$ 3,8
5,51-6,00 (6)	49,1	58,7	54,0 $\pm$ 2,1
>6,01 (3)	50,4	58,9	54,3 $\pm$ 1,9
Микрополевые опыты			
<5,0 (15)	6,4	59,2	22,5 $\pm$ 2,7
5,01-6,00 (21)	9,6	61,8	30,9 $\pm$ 2,8
>6,01 (15)	13,4	65,6	28,1 $\pm$ 2,6

Примечание: в скобках – количество опыто-лет

Таблица 6

Использование азота удобрений в микрополевых опытах

$pH_{kcl}$	ГТК в период вегетации пшеницы					
	< 0,75 (12)			> 0,75 (6)		
	минимум	максимум	среднее	минимум	максимум	среднее
< 5,0	5,4	34,3	16,6	13,8	59,2	34,2
5,01-6,00	9,6	41,3	23,4	18,5	61,8	43,5
> 6,01	13,4	49,1	27,9	26,8	65,6	40,0

Примечание: в скобках – количество опыто-лет

Исследованиями в микрополевом опыте выявлено, что при недостатке влаги в период активного роста пшеницы количество азота, используемого растениями, не превышало 156-310 мг/делянку. При этом увеличение дозы азота в 3 раза обеспечивало рост потребления его лишь в 1,4-1,6 раз. С улучшением влагообеспеченности количество азота удобрений возрастало до 541-1854 мг/делянку.

При увеличении дозы азота с 5 до 10 мг/100 г почвы коэффициент использования азота удобрений снижался с 12,0-26,5 до 10,0-20,6% от внесенного количества. Однако при этом общее количество азота, потребленного из удобрений по мере роста их доз, увеличилось со 120-265 мг/делянку до 201-412 мг.

В вегетационном опыте, проведенном на фоне известкования, выявлено, что на среднекислом черноземе при увеличении доз азота аммиачной селитры с 5 до 20 мг/100 г почвы вынос азота удобрения увеличивался с 75 до

274 мг/сосуд, на слабокислой почве – с 79 до 358 мг/сосуд. При этом наибольшее потребление азота (в % от внесенного количества) отмечено при дозах 10-15 мг/100 г почвы: 33,8-32,4% на известкованной почве и 37,8-37,2% на фоне известкования.

В условиях вегетационного опыта на кислом черноземе ( $pH_{kcl}$  4,62) оптимальная доза азота под яровую пшеницу составила 10 мг/100 г почвы. При каждой последующей дозе по сравнению с предыдущей эффективность азотных удобрений снижалась (рис. 4). На черноземе с  $pH$  5,33 коэффициент использования азота несколько повышался, а урожайность практически не изменялась.

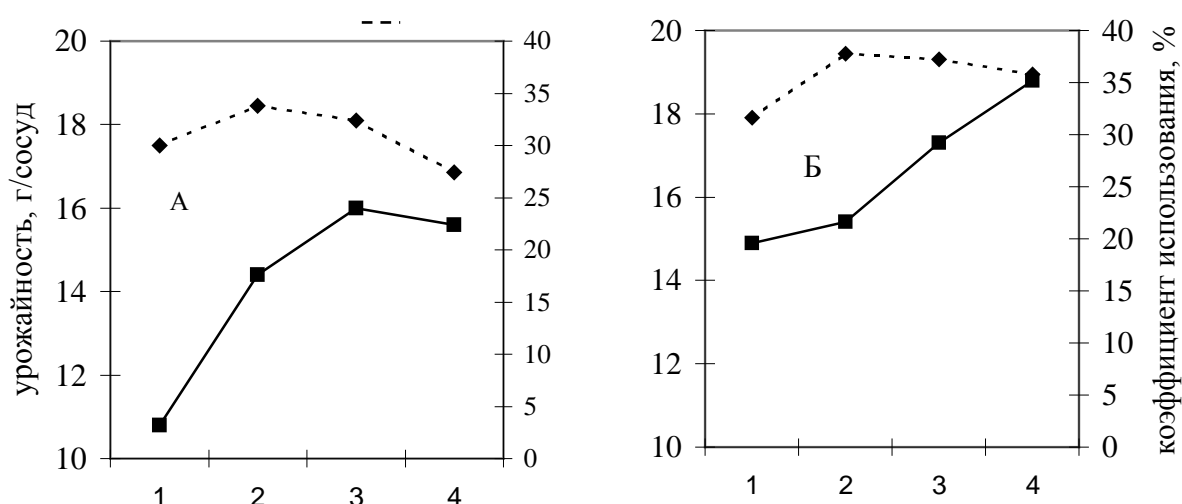


Рис. 4. Эффективность доз аммиачной селитры под яровую пшеницу на черноземе выщелоченном (вегетационный опыт, среднее за 1990-1992 гг.)

А-  $pH$  4,62, Б –  $pH$  5,33; дозы азота, мг/100 г почвы: 1 – 5, 2 – 10, 3 – 15, 4 – 20  
 — урожайность, г/сосуд    ---- коэффициент использования

Аналогичные данные получены и в полевом мелкоделяночном опыте, где в среднем за три года исследований по мере роста доз азота с 40 до 120 кг/га количество использованного азота удобрения не менялось.

В оптимизации азотного питания растений немаловажное значение имеет форма азота удобрения. Результатами исследований, проведенных в условиях полевого мелкоделяночного опыта, определено, что растения пшеницы потребляли больше азота из аммиачной селитры (40,4–46,6% в среднем за два года), чем из сульфата аммония (32,4–37,3%). При известковании, независимо от формы удобрения, коэффициент использования азота повышался на 2,7–10,0%.

В опытах на черноземе выщелоченном лесостепного Поволжья выявлено, что потребление азота яровой пшеницей зависело от общего уровня плодородия почвы, обусловленного ее предварительной удобренностью.

Доля азота сульфата аммония, внесенного в составе NPK в создании урожая пшеницы на черноземе, ранее не удобрявшемся, в среднем за 3 года, составила 44,5%, на фонах навоза и минеральных удобрений – 48,0%.

Известкование усиливало потребление азота на всех фонах. Однако повышение коэффициента использования было неодинаковым. Действие известкования на усвоение азота аммиачной селитры наиболее сильно проявлялось на почве, длительное время не получавшей удобрений. При этом коэффициент использования удобрений, в среднем за 3 года, увеличился на 6,5%. Влияние известкования на почве с систематическим внесением NPK на потребление вновь внесенного азота было меньше. При этом рост КИУ от доломитовой муки составил только 2,1%.

Отмеченные особенности использования вновь внесенного азота яровой пшеницей на черноземе выщелоченном в условиях Поволжья в зависимости от органической и органо-минеральной систем удобрения характерны и для других почв (Минеев, Шевцова, 1977; Кореньков, 1999; Гамзилов, Барсуков, 2001).

Использование азота удобрений во многом определяется их видом. Количество азота ( $^{15}\text{NH}_4$ ) $_2\text{SO}_4$  в создании урожая первой культуры – озимой ржи – составляло 44,9% от внесенного, органического азота – от 5,8 до 24,6%. Прибавка урожая последующих культур формировалась в основном за счет азота почвы (табл. 7).

Таблица 7

Использование азота удобрений культурами севооборота в микрополеводном опыте с применением  $^{15}\text{N}$ , % от внесенного

Варианты	Озимая рожь	Просо	Яровая пшеница	В сумме по трем культурам
( $^{15}\text{NH}_4$ ) $_2\text{SO}_4$	44,9	2,0	2,1	49,0
$^{15}\text{N}$ донника	24,6	5,1	1,9	31,6
$^{15}\text{N}$ соломы	5,8	1,9	1,1	8,8
$^{15}\text{N}$ донника + $^{14}\text{N}$ соломы	13,8	4,6	1,5	19,9
$^{15}\text{N}$ соломы + $^{14}\text{N}$ донника	10,2	4,8	1,3	16,3

#### *Дополнительное использование азота почвы при внесении азотных удобрений*

В результате внешнего воздействия, вызванного использованием азотных удобрений, усиливается мобилизация минерального азота из почвенных запасов. Это явление получило название «экстра»-азота (Турчин, Берсенева, Жидких, Лобовикова, 1960; Андреева, Щеглова, 1964; Замятина, 1967; Смирнов, 1970; Сапожников, 1968; Кореньков, 1976; Кудеяров, 1989). В англоязычной литературе оно называется «затравочный» или «первичный» эффект (priming effect) (Jansson 1958; Legg, Allison, 1960; Broadbent, 1965), добавочный эффект взаимодействия – «added nitrogen interaction» – ANI (Jenkinson et al., 1985).

Для надежного прогнозирования экологической и агрономической эффективности «экстра»-азота необходимо знать условия его образования и учитывать точное количество в конкретных почвенно-климатических условиях (Кореньков, 1999).



В связи с тем, что растения при использовании азотных удобрений способны к дополнительному использованию почвенного азота на формирование урожая, нами изучены различные почвенно-агрохимические факторы, которые прямо или косвенно влияют на параметры внутрипочвенного азотного цикла.

Изучение динамики процессов минерализации органического азота в зависимости от доз применяемых азотных удобрений показало, что минерализующий эффект азотного удобрения наиболее четко проявился в начальный период вегетации растений пшеницы. Спустя 3 недели после внесения удобрений увеличение содержания минерального азота в вариантах с внесением доз азота 40–120 кг/га находилось в пределах 131–318%, а в среднем за 3 года – 170–270% по отношению к варианту  $P_{30}K_{30}$ . Определение минерального «экстра»-азота почвы в последующие фазы вегетации растений выявило ослабление минерализующего эффекта азотного удобрения, хотя даже к периоду уборки количество его составляло 17–42% к фону.

Установлено, что при использовании  $N_{40}$  на фоне  $P_{30}K_{30}$  величина дополнительного использования азота почвы («экстра» - азота) по сравнению с фоном составила, в среднем за 3 года 17,1% от общего выноса, с колебаниями по годам от 188 до 441 мг/делянку.

Известкование по 1,0 Нг способствовало увеличению количества потребленного «экстра»-азота до 23,8% от общего выноса в микрополеводном и с 2,8-11,4 до 15,1-29,6% в вегетационном опытах. Наибольшее положительное действие известкования на дополнительную мобилизацию почвенного азота проявлялось в варианте с использованием почвы, в течение 8 лет не получавшей удобрений.

Изучение влияния реакции среды на использование почвенного азота позволило установить, что сдвиг ее с сильнокислого до нейтрального уровня способствовал увеличению размеров потребления азота почвы в 1,7 раза. При этом величина использования «экстра»-азота увеличивалась с 41 до 168 мг/делянку или с 7,5 до 16,3% от выноса.

Большинство исследователей при изучении минерализующего эффекта азотных удобрений прибегают только к частичной оценке, т.е. к определению величин «экстра»-азота в растениях (Кореньков, 1976, 1999; Кудеяров, 1989; Муравин, 1989; Шарков, 1992; Кидин, 1993; Гамзиков, Барсукова, 2000). Однако дополнительно минерализованный азот может повторно вовлекаться во внутрипочвенный цикл азота путем иммобилизации или теряться вследствие денитрификации.

Учет превращений иммобилизованного азота, его потерь и использования растениями позволил определить размеры нетто-минерализации как результирующего показателя внутрипочвенного цикла, т.е. накопление минерального азота в результате взаимодействия двух процессов – минерализации и иммобилизации.

Количество «экстра»-азота, образованного в результате полного учета внутрипочвенного цикла превращений азота (ЭАн), было выше, чем выявленного по разнице выноса азота растениями на вариантах NPK и PK (ЭАр) и

по разнице сумм выноса почвенного азота растениями и содержащегося в почве  $^{14}\text{N}_{\text{мин}}$  (ЭАб).

Между величинами «экстра»-азота,  $\text{pH}_{\text{kcl}}$  и дозами азота обнаружена линейная зависимость, которая выражается следующими уравнениями регрессии ( $n = 32$ ):

$$\text{ЭАр} = 0,178\text{pH} + 0,05\text{N} - 0,536, \quad r = 0,82$$

$$\text{ЭАб} = 0,206\text{pH} + 0,016\text{N} - 0,706, \quad r = 0,89$$

$$\text{ЭАн} = 0,244\text{pH} + 0,196\text{N} - 1,27, \quad r = 0,82$$

Наибольшая дополнительная мобилизация почвенного азота (ЭАр) происходила в черноземе при реакции среды близкой к нейтральной ( $\text{pH}$  6.5-7.5) и составляла 0,14-0,15 единиц на единицу внесенного азота удобрения.

Как известно, микробиологические процессы в почве активно протекают при оптимальных значениях температуры и влажности, отклонение от которых приводит к изменению направленности этих процессов или их временному затуханию. Наблюдения за величиной «экстра»-азота показали, что наибольшее накопление и использование его в условиях лесостепной зоны происходит при гидротермическом коэффициенте в период вегетации яровых зерновых культур больше 0,8.

Обобщение данных микрополевых и вегетационных опытов позволило заключить, что количество «экстра»-азота, участвующего в создании урожая, составляет 2,9-15,7% от общего выноса растениями пшеницы (табл. 8). Величина урожая тесно коррелирует с размерами потребления «экстра»-азота ( $r = 0,64-0,79$ ).

Дозы удобрений (40 и 120 кг/га  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) по-разному влияли на мобилизацию почвенного азота. С повышением дозы N процесс поступления «экстра» - азота в растения яровой пшеницы ингибировался и величина его была отрицательной (-331 мг/делянку в среднем за 3 года).

Основной причиной отсутствия эффекта дополнительного усвоения азота при увеличении доз с 40 до 120 кг/га является, вероятно, то обстоятельство, что при высоких дозах в почве на ранних этапах развития яровой пшеницы создается запас усвояемых его форм преимущественно за счет азота удобрения. Растения пшеницы, имеющие сравнительно короткий период интенсивного потребления азота, в значительной мере удовлетворяют свои потребности в нем именно в тот период за счет азота удобрений. Таким образом, при внесении высоких доз удобрений в растениях накапливалось меньше почвенного азота, чем в случае его небольших доз.

Аналогичная картина выявлена и в вегетационном опыте при выращивании яровой пшеницы сорта Воронежская 6, где с увеличением доз азота с 5 до 20 мг/100 г почвы дополнительное потребление почвенного азота сокращалось с 42 до -129 мг/сосуд.

Изучение сроков внесения показало, что осеннее внесение сульфата аммония, вне зависимости от глубины и фона предварительной удобренности, не вызывало дополнительное использование азота почвы. Величина «экстра»-азота при внесении на глубину 10 и 30 см составляла -296-128 мг/делянку, с колебаниями по годам от -419 до +254 мг/дел. Перенесение

срока внесения на весну обеспечило несколько бо́льшее усвоение почвенного азота, а размеры «экстра»-азота были выше, чем при осеннем внесении на 104-192 мг/дел.

Таблица 8

Доля участия азота почвы и удобрений в формировании урожая яровой пшеницы в зависимости от уровня рН, % от общего выноса растениями

рН	Из удобрения			Из почвы всего			в т.ч. «экстра»-азот		
	Min	Max	M <sub>±</sub> m	Min	max	M <sub>±</sub> m	min	max	M <sub>±</sub> m
	Вегетационные опыты, среднее по дозам 5-10 мг/100 г почвы (n = 36)								
<5,0 (15)	17,3	44,9	32,1±2,8	55,1	82,7	67,9+2,3	-9,0	18,1	8,5+2,1
5,01- 5,50 (12)	14,3	36,6	27,5±2,7	62,8	86,2	72,5+2,2	-3,9	24,4	11,1+2,3
5,51- 6,00 (6)	27,0	34,8	29,9±1,6	65,2	73,0	70,1+1,5	-7,1	23,9	12,2+2,0
>6,01 (3)	26,6	33,4	29,1±1,5	66,6	73,4	70,9+1,8	11,1	21,0	15,7+1,6
Урав- нение регрес- сии	Y=158,7- 47,3pH+4,28pH <sup>2</sup> r <sup>2</sup> =0,676			Y= -58,7+47,3pH - 4,28pH <sup>2</sup> r <sup>2</sup> =0,676			Y = 47,3 - 18,45pH + 2,17pH <sup>2</sup> r <sup>2</sup> =0,977.		
	Микрополевые опыты								
<5,0 (15)	13,6	72,0	35,5±3,5	28,0	86,4	64,5±4,9	-24,8	25,1	2,9±1,3
5,01- 6,00 (21)	16,1	70,5	35,7±3,3	29,5	83,9	64,3±5,1	-20,1	26,6	8,2±2,5
>6,01 (15)	21,2	67,2	35,5±2,9	32,8	78,8	64,8±3,7	10,8	18,2	14,7±2,9
Урав- нение регрес- сии	И=36,6-0,21pH r <sup>2</sup> =0,614			Y=63,4+0,21pH r <sup>2</sup> =0,614			Y=-4,68+2,40pH r <sup>2</sup> =0,999		

Примечание: в скобках – количество опыто-лет

Различная предварительная удобренность почвы оказывала существенное влияние на соотношение потребления азота из разных источников в вегетационном опыте. При использовании органической и органо-минеральной систем удобрения величина «экстра»- азота возрастала с 13 мг/сосуд до 49-66 мг/сосуд, или с 2,8 до 8,3-11,4% от общего выноса растениями пшеницы.

Основной причиной этого, вероятно, является снижение запасов азота в активной фазе почвы, длительное время не получавшей удобрений, на что указывали и другие исследователи (Башкин, 1987; Кудеяров, 1989; Семенов, 1999)

Обобщение экспериментальных данных позволило установить, что урожайность зерна яровой пшеницы сорта Пирамида на 26% формировалась за счет азота удобрений и на 74% за счет азота почвы, в т. ч. на 12% за счет

«экстра»-азота. Прибавки урожая зерна обусловлены поглощением азота удобрения ( $r=0,88$ ), «экстра»-азота ( $r=0,96$ ) и почвенного азота ( $r=0,66$ ).

Уравнение множественной регрессии между прибавками урожая и потреблением азота из различных источников имело следующий вид:

$$Y = 0,298x_1 - 0,111x_2 + 0,635x_3, \quad r^2 = 0,931$$

где  $x_1$  – использование азота из удобрений;  $x_2$  – использование азота из почвы;  $x_3$  – «экстра»-азот (процент от общего выноса).

Изменение кислотности с среднекислого уровня ( $pH < 5,0$ ) до реакции среды, близкой к нейтральной ( $pH 5,51-6,0$  и  $> 6,0$ ), увеличивало мобилизацию почвенного азота с 0,07 до 0,21–0,30 ед на единицу внесенного азота удобрений в среднем в вегетационных опытах и с 0,02 до 0,10 – в микрополевых.

Таким образом, процессы образования «экстра»-азота, как составной части общего цикла превращений азота в системе «удобрение-почва-растение», зависят как от активности почвенных микробных и ферментных систем, так и от реакции почвенной среды, выступающей в качестве одного из основных регуляторов потоков внутрипочвенного цикла азота.

Это имеет важное практическое значение для корректировки доз азотных удобрений и снижения антропогенной нагрузки технического азота на агроэкосистему.

### ***Иммобилизация азота удобрений в черноземе выщелоченном***

Наряду с использованием азота удобрений происходит его иммобилизация (закрепление) в органическом веществе почвы. Иммобилизация, с одной стороны, может рассматриваться как положительное явление, препятствующее непроизводительным потерям азота, с другой – как процесс временного отчуждения азота удобрений. С течением времени иммобилизованный азот может подвергаться повторной минерализации и использоваться растениями.

В условиях лабораторного опыта, проведенного с использованием почвы, в течение 10 лет получавшей различные системы удобрения выявлено, что количество иммобилизованного азота было обусловлено микробиологической и энзиматической активностью почв. Уже через 3 дня после внесения от 8,2 до 17,1% азота закреплялось в форме органических соединений.

Иммобилизация азота удобрений определялась целым комплексом биотических и эдафических факторов, и в первую очередь, активностью микробноценозов. Максимальное количество азота в почве (43,5–68,2% от внесенного количества) обнаружено на 30-ые сутки после внесения удобрений. В дальнейшем отмечалось постепенное снижение количества иммобилизованного азота. На 30–60-ые сутки коэффициенты корреляции между размерами закрепления азота и количеством микроорганизмов на МПА составили +0,94–0,98, КАА (–0,50–0,52), олиготрофов (+0,96–0,98), педотрофов (–0,78–0,82), активностью протеазы (0,98) и уреазы (0,66–0,63).

Известкование сильнокислого чернозема изменяло направленность процессов трансформации иммобилизованного азота. Установлено, что в начале вегетации количество легкоминерализуемого и минерального азота при нейтрализации кислотности было выше, чем в неизвесткованной почве, а негидролизуемого – в 2,5 раза меньше. В течение вегетации устойчивость закрепленного азота возрастала, о чем свидетельствует снижение отношения  $^{15}\text{N}_{\text{лг.}}:^{15}\text{N}_{\text{нг}}$  с 6,4 до 1,5 или в 4,36 раза.

Распределение меченого азота во фракциях почвенного азота зависело от гидротермических условий периода вегетации. В условиях засушливых лет (ГТК 0,53-0,56) закрепление азота усиливалось. Отношение органического азота к минеральному при этом составляло 43,6, а в благоприятные по увлажнению годы (ГТК 1,02-1,17) – только 10,1.

Изучение динамики содержания иммобилизованного азота в период вегетации яровой пшеницы показало, что с увеличением времени взаимодействия удобрений с почвой количество минерального азота уменьшалось. Если в фазу кушения было обнаружено 14,8% от внесенного  $^{15}\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$ , то к уборке его осталось только 2,5 %. При этом происходили существенные изменения в содержании меченого азота, что проявлялось в снижении количества легкогидролизуемых форм с 30,9 до 6,8% от общего содержания  $^{15}\text{N}$  в почве.

Превращение различных видов удобрений значительно различалось. Определение количества закрепленного в почве азота после уборки озимой ржи показало, что при внесении в почву овсяной соломы, бедной азотом (C:N = 100), но являющейся энергетическим источником для микроорганизмов, усиливалась иммобилизация азота (табл. 9). Добавление к меченой соломе немеченой зеленой массы донника и наоборот в первом случае снижало величину иммобилизации, а во втором – увеличивало ее, что вероятно, обусловлено различиями в составе микробных ценозов, осуществляющих иммобилизационные процессы.

Таблица 9

Иммобилизация азота удобрений в черноземе выщелоченном, % от внесенного

Вариант	$\text{N}_{\text{общ.}}$			$\text{N}_{\text{лов.}}$			$\text{N}_{\text{лгк.}}$		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
$(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	37,1	15,4	8,4	12,2	1,1	0,9	8,3	2,8	0,5
$^{15}\text{N}$ донника	62,1	41,5	30,7	19,0	5,1	4,3	16,5	6,2	3,7
$^{15}\text{N}$ соломы	85,8	72,6	59,6	38,4	17,8	13,2	41,6	25,9	20,6
$^{15}\text{N}$ донника + $^{14}\text{N}$ соломы	74,5	58,3	39,2	29,7	8,4	7,2	32,4	16,2	13,3
$^{15}\text{N}$ соломы + $^{14}\text{N}$ донника	69,7	61,2	47,9	30,4	12,8	10,7	36,8	21,4	16,7

Примечание: 1- через 1 год после заделки удобрений, 2- через 2 года, 3 - через 4 года

### *Потери азота удобрений*

Изучение миграции ( $^{15}\text{NH}_4$ ) $_2\text{SO}_4$  в течение трех лет выявило, что глубокого проникновения азота в почву не наблюдалось, хотя отбор почвенных образцов проводился до глубины 3 м. В разные годы проведения исследований наблюдалась как нисходящая, так и восходящая миграция азота. Как правило, во второй половине вегетации пшеницы происходило перемещение азота с глубины 30-90 см в верхние слои почвы.

Наибольшие потери отмечались при внесении удобрений на глубину 10 и 30 см.

Таким образом, в условиях правобережной лесостепи Среднего Поволжья на тяжелосуглинистых черноземах существенных потерь нитратного азота за счет миграции не происходит. Незначительное вымывание нитратов из пахотного слоя не вызывает их потери, т.к. корневая система зерновых культур способна использовать этот азот практически из всей метровой толщи.

Кислая реакция черноземов усиливала потери азота удобрений из пахотного слоя: при рН 4,35-4,50 они составляли 22,5-34,5% от внесенного, а при 5,2-5,3 – 19,8-29,1%. Снижение размера потерь азота было обусловлено, в основном, усилением выноса меченого азота растениями яровой пшеницы. При росте значений рН<sub>кел</sub> с 4,5 до 7,5 величина потерь снижалась в 1,4-1,6 раза.

Обобщение экспериментальных данных вегетационных и микрополевых опытов с известкованием позволило количественно описать влияние реакции среды на размеры потерь азота удобрений (табл. 10).

Учитывая, что потери азота в условиях черноземов тяжелого гранулометрического состава в результате вымывания незначительны, можно предположить, что основная их доля приходится на газообразные продукты.

Величина потерь азота во многом определяется дозами его внесения. Так, в полевых условиях при увеличении доз с 40 до 120 кг/га на фоне Р<sub>30</sub>К<sub>30</sub> потери азота возрастали в 4,6 раза. В вегетационном опыте при возрастании доз с 5 до 20 мг/100 г почвы непроизводительные потери увеличивались 7,8-7,9 раза.

Срок внесения ( $^{15}\text{NH}_4$ ) $_2\text{SO}_4$  существенного не влиял на величину потерь азота. Наибольшее воздействие оказывала глубина заделки удобрения. В среднем за 3 года исследований минимальные потери азота – 12,7-19,8% выявлены при внесении азота на глубину 90 см. Наибольшие потери отмечены при внесении на глубину 10 см – 21,0-36,1%.

### **ВЛИЯНИЕ УДОБРЕНИЙ НА УРОЖАЙНОСТЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР И КАЧЕСТВО ПРОДУКЦИИ**

На процессы формирования урожая влияет целый комплекс экологических факторов: гидротермические условия, свойства почв, обеспеченность

растений элементами минерального питания. Несмотря на наличие у растений защитных механизмов, неблагоприятные факторы, в том числе и повышенная кислотность, нарушают продукционный процесс и формирование качества урожая.

Таблица 10

Потери азота удобрений на черноземе выщелоченном разного уровня кислотности, % от внесенного

pH	min	max	M $\pm$ m	V, %
	Вегетационные опыты, среднее по дозам 5-10 мг/100 г почвы (n = 36)			
<5,0 (15)	14,8	41,9	25,1 $\pm$ 2,3	28,1
5,01-5,50 (12)	12,0	34,3	21,0 $\pm$ 1,8	20,4
5,51-6,00 (6)	9,2	24,4	17,5 $\pm$ 1,4	16,5
>6,01 (3)	10,7	18,7	14,1 $\pm$ 1,2	14,3
Уравнение регрессии	$\Pi = 12,9+10,5\text{pH}-1,69\text{pH}^2$ , $r^2=0,999$			
	Микрополевые опыты, n= 51			
<5,0 (15)	10,7	56,3	39,2 $\pm$ 2,3	22,5
5,01-6,00 (21)	8,8	46,7	28,8 $\pm$ 2,1	19,7
>6,01 (15)	16,8	39,3	31,5 $\pm$ 3,2	18,8
Уравнение регрессии	$\Pi = 20,1+18,2\text{pH}-0,20\text{pH}^2$ , $r^2=0,740$			

Примечание: в скобках – количество опыто-лет

### *Урожайность яровой пшеницы при использовании азотных удобрений и известковании*

Изучение различных уровней рН<sub>кел</sub> показало, что сорта мягкой яровой пшеницы по-разному реагируют на изменение реакции среды. Оптимальный уровень почвенной среды для сортов Л-503, Прохоровка и Лада находился в интервале 5,5–6,5, Ишеевская – 5,5–7,0, Харьковская-10 – 6,5–7,0 и Пирамида – 6,5–7,5.

Зависимость урожайности изучаемых сортов пшеницы от реакции среды чернозема выщелоченного описывалась уравнением полинома с половинными степенями (табл. 11).

Реакция среды оказывала воздействие на качество зерна пшеницы. При росте рН до 6,5-7,0 количество белка увеличивалось и было максимальным у сорта Лада при рН – 6,0; Л-503 и Прохоровка – 6,5; Ишеевская, Пирамида, Харьковская-10 – при рН 7,0.

Оптимальная величина рН для накопления сырой клейковины составила: для сортов Лада – 6,0; Л-503 и Прохоровка – 6,5; Ишеевская, Пирамида и Харьковская-10 – 7,0.

Уравнения зависимости урожайности яровой пшеницы (у) от величины  $pH_{kcl}$  за 1997–1999 гг.

Сорта	Уравнение	$R^2$
Л-503	$y = -198 - 34,8pH + 175pH^{0,5}$	0,96
Прохоровка	$y = -209 - 36,6pH + 183pH^{0,5}$	0,95
Ишеевская	$y = -120 - 21,8pH + 110pH^{0,5}$	0,96
Пирамида	$y = -70 - 11,1pH + 63pH^{0,5}$	0,99
Харьковская-10	$y = -122 - 20,8pH + 109pH^{0,5}$	0,98
Лада	$y = -193 - 34,9pH + 172pH^{0,5}$	0,92

В вегетационных опытах выявлено, что окупаемость единицы азота удобрений прибавкой урожая основной продукции на почве с  $pH > 6$  (6,0-6,1) была в два раза выше по сравнению с почвой, имеющей сильно- и среднекислую реакцию среды.

В микрополевых опытах, проведенных с дозами азота 4,0-28,3 (в среднем 16,3) г/м<sup>2</sup>, выявлено, что урожайность пшеницы в значительной мере определялось взаимодействием кислотности и складывающимися гидротермическими особенностями периода вегетации (табл. 12). Так, при ГТК < 0,75 на почве с кислой реакцией среды ( $pH_{kcl} < 5,0$ ) прибавка урожайности составила всего 25,8 г/м<sup>2</sup> (15,1% к фону). Нейтрализация кислотности и доведение уровня pH до величины > 6,0 обеспечивали рост продуктивности на 103,1 г/м<sup>2</sup> (40,2 %).

В условиях более благоприятного сочетания температуры и влаги (ГТК > 0,75) при этих же уровнях pH прибавки урожайности составляли соответственно 65,4 и 195,5 г/м<sup>2</sup> (27,6-60,2%)

Окупаемость 1 г азотных удобрений возрастала с 1,8 г зерна (при  $pH < 5,0$  и ГТК < 0,75) до 9,9 г (в 5,6 раза), при благоприятных условиях ГТК и  $pH > 6,0$ .

Агрономическая эффективность азотных удобрений в значительной мере определялась процессами их внутрипочвенной трансформации и поглощением азота растениями яровой пшеницы. Коэффициенты использования азота из удобрений и поглощения азота растениями являются самостоятельными показателями, характеризующими этапы формирования эффекта от удобрений. Первый показывает характер превращения азота удобрений почве и влияние растений на эти превращения. Второй характеризует эффективность потребления растениями запасов минерального азота, сформированных из удобрения и «экстра»-азота. Поскольку процессы превращения в почве и потребления азота растениями во многом взаимосвязаны, нами установлена связь между этими показателями:

$$\begin{array}{lll}
 АЭ = 2,76 + 0,49 \text{ КИ}; & r = 0,487; & t_{\phi} > t_{0,01} \\
 АЭ = 2,39 + 0,72 \text{ КП}; & r = 0,716; & t_{\phi} > t_{0,01} \\
 ФЭ = 20,7 + 0,28 \text{ КИ} - 0,23 \text{ КП}; & r = 0,263; & t_{\phi} > t_{0,05}
 \end{array}$$



Таблица 12

Эффективность азотных удобрений в зависимости от уровня рН и гидро-термических условий периода вегетации при возделывании яровой пшеницы, микрополевые опыты, г/м<sup>2</sup>.

Уровень рН <sub>kcl</sub>	Урожайность зерна, г/м <sup>2</sup>				
	РК	НРК	Прибавка от азота	Доза азота	Окупаемость 1 г азота/ г урожая
	Зерно				
	ГТК < 0,75, n = 48				
< 5,0	171,3	197,1	25,8	14,5	1,77
5,0 – 6,0	205,1	246,5	41,4	14,5	2,86
> 6,0	256,2	359,3	103,1	19,8	5,21
	ГТК > 0,75, n = 16				
< 5,0	237,3	302,7	65,4	14,5	4,51
5,0 – 6,0	287,9	386,5	98,6	14,5	6,80
> 6,0	324,8	520,3	195,5	19,8	9,87
Сухое вещество, n = 48					
	ГТК < 0,75				
< 5,0	367,1	439,1	72,0	14,5	4,97
5,0 – 6,0	441,5	549,2	107,7	14,5	7,43
> 6,0	566,4	801,2	234,8	19,8	11,86
	ГТК > 0,75, n = 16				
< 5,0	534,6	697,1	162,5	14,5	11,21
5,0 – 6,0	633,1	862,6	229,5	14,5	15,83
> 6,0	685,5	1094,4	408,9	19,8	20,65

Усвоение азота представляет собой физиолого-биохимический этап его участия в продукционном процессе растений, на котором осуществляется ассимиляция поглощенных растениями N-NH<sub>4</sub> N-NO<sub>3</sub> и синтез сложных органических соединений. Влияние азотных удобрений на усвоение азота оценивается показателем «физиологическая эффективность» (ФЭ), которая выражает оплату потребленного растениями азота удобрений и «экстра»-азота прибавкой урожая основной продукции (сухого вещества).

Обобщение данных исследований в полевых опытах, проведенных в 1986-2002 гг., позволило установить, что на почве с сильно- и среднекислой реакцией (рН 4,35-4,90) в условиях засушливых лет (ГТК < 0,75) прибавка урожайности зерна не превышала 0,23-0,47 т/га (соответственно при использовании N<sub>40</sub>P<sub>30</sub>K<sub>30</sub> и N<sub>80</sub>P<sub>60</sub>K<sub>60</sub>). Повышение уровня рН внесением доломитовой муки до 5,2-5,8 способствовало получению прибавок зерна в количестве 0,32-0,46 т/га. Следует отметить, что в условиях засушливого лета применение повышенных доз минеральных удобрений не оказывало положительного влияния даже при нейтрализации кислотности.

Иная картина складывалась при благоприятном сочетании тепла и влаги. При этом на кислом черноземе от указанных выше доз прибавка урожай-

ности зерна составляла 0,52-0,66 т/га, а при нейтрализации – увеличивалась до 0,63-0,86 т/га.

Интегральной характеристикой эффективности использования минеральных удобрений и мелиорантов является их окупаемость прибавкой зерна и другой растениеводческой продукции. Установлено, что она возрастала с 2,3-5,2 кг зерна при рН 4,35-4,90 до 3,2-6,3 кг при рН 5,2-5,8.

В полевых опытах под влиянием известкования содержание белка в зерне пшеницы возрастало на 0,4-0,6%.

Оптимизация условий питания пшеницы также способствовала улучшению качества зерна. Наибольшая прибавка белка в зерне отмечена на вариантах с органо-минеральной системой удобрения на известкованном фоне.

Удобрения и известкование повлияли на величину сырой клейковины. В условиях засушливых лет содержание сырой клейковины было выше, чем в год с нормальным увлажнением. При органической и органо-минеральной системах удобрений была выявлена тенденция повышения данного показателя на 0,8-3,9%. Известкование способствовало росту клейковины, в среднем за годы исследований на 0,5-1,2%.

#### ***Влияние известкования и систем удобрения на продуктивность полевых севооборотов***

Исследованиями в стационарных полевых опытах в различных зонах Пензенской области выявлено, что эффективность использования минеральных удобрений во многом определялась уровнем  $pH_{kcl}$ . На сильнокислом черноземе выщелоченном ( $pH_{kcl}$ -4,35) продуктивность увеличивалась на 0,27-0,48 т/га з.ед. в год. Нейтрализация кислотности и доведение уровня рН до близкого к нейтральной обеспечивало повышение продуктивности на уровне 0,30-0,84 т/га з.ед. в год. При этом окупаемость 1 кг NPK на сильнокислом черноземе составляла при одинарной дозе удобрений 2,3 з.ед, при двойной и тройной 1,8-1,4 кг з.ед. соответственно. Применение мелиоранта позволило повысить окупаемость туков при одинарной дозе их использования до 2,6-4,1 кг з.ед, при двойной и тройной – до 2,0-3,2 и 1,6-2,4 кг в год, т.е. в 1,1-1,8 раза.

На черноземе оподзоленном тяжелосуглинистом устранение избыточной кислотности на неудобренном фоне способствовало росту продуктивности севооборота на 0,06-0,22 т/га з.ед. в зависимости от доз доломитовой муки. Дозы используемых минеральных удобрений не оказывали существенного влияния на эффективность доломитовой муки.

Наибольший эффект известкования выявлен на черноземе оподзоленном среднесуглинистом. В зависимости от доз доломитовой муки прирост урожайности достигал, без использования минеральных удобрений, 0,03-0,16 т/га з.ед. В среднем по уровням минерального питания под влиянием доломитовой муки продуктивность севооборота увеличивалась на 0,13-0,31 т/га з.ед. в год.

Изучение действия известкования и различных систем удобрения, проведенное в 1993-2002 гг. в различных видах полевых севооборотов, показало, что в среднем за 2 ротации в зернопаропропашном севообороте наибольшая

эффективность известкования выявлена при использовании минеральной системы удобрения и достигала 0,21-0,23 т/га з.ед. в год. При применении органической (8 т навоза на 1 га пашни в год) и ее сочетании с минеральной прибавки продуктивности от известкования были на уровне 0,10-0,24 т/га в год. В зернопропашном севообороте прибавка продуктивности от действия доломитовой муки составляла соответственно 0,25-0,25 и 0,10-0,15 т/га, в зерно-травянопропашном – 0,23 и 0,18-0,20 т/га з.ед.

Использование органической системы удобрения в среднем за две ротации было наиболее эффективным в зернопаропропашном севообороте (0,42-0,44 т/га) и наименее – в зернотравянопропашном (0,27-0,32 т/га в год).

Использование  $N_{26-38}P_{26-39}K_{26-45}$  способствовало получению 0,56-0,64 т/га з.ед в год в зернопаропропашном севообороте и 0,41-0,56 – в зернопропашном. При этом, в отличие от органической системы, применение доломитовой муки способствовало росту эффективности минеральных удобрений на 0,05-0,14 т/га з.ед. в год.

### *Эффективность биологического азота в питании зерновых культур*

Проблема обеспечения растений азотным питанием остается одной из наиболее важных в современной земледелии. Традиционно она решалась с использованием химически связанного азота. Актуальным становится поиск путей, способствующих увеличению доли биологического азота в обеспечении сельскохозяйственных культур азотным питанием (Патыка, 1986; Умаров, 1986; Кудеяров, 1989; Кожемяков, Хотянович, 1997).

Изучение эффективности инокуляции семян яровой пшеницы сорта Л-503 ризоагрином (*Agrobacterium radiobacter*), проведенное в микрополевым опыте на чернозёме выщелоченном, показало, что бактериализация является эффективным приемом повышения продуктивности этой культуры. В среднем за три года проведения опыта (1997-1999 гг.) урожайность зерна на фосфорно-калийном фоне увеличилась на 11%, фоне NPK – на 7% по сравнению с неинокулированными растениями.

Наиболее сильно эффект инокуляции проявился на почве с pH 5,5–6,5, где прирост урожая зерна был в пределах 8-27% в зависимости от погодных условий периода вегетации. В засушливые годы (ГТК 0,54–0,57) прибавка от инокуляции была небольшой, в благоприятных условиях она повышалась в 1,4–1,8 раза.

Положительное влияние бактериализации семян на продуктивность яровой пшеницы обусловлено в значительной мере фиксацией азота. Использование меченой аммиачной селитры дало возможность оценить участие азота атмосферы в питании растений. При этом реальные размеры фиксированного азота обуславливались, в первую очередь, кислотностью почвенного раствора. Чернозем с pH 4,5 ингибировал действие азотфиксаторов, и количество азота, использованного растениями пшеницы за счет фиксации из атмосферы, не превышало 4,5% от общего выноса (в среднем за три года исследований).

При росте рН до 5,5 оно возрастало до 7,8%, а при рН 6,5 составило 17,2% от суммарного выноса азота растениями (табл. 13).

Таблица 13

Вынос азота яровой пшеницей в зависимости от уровня  $pH_{kcl}$  и применения удобрений, среднее за 1997-1999 гг.

$pH_{kcl}$	Варианты	Вынос азота яровой пшеницей			
		всего, мг/сосуд	из поч- вы	удобрений	атмосферы
				%	
4,5	РК	406	100,0	-	-
	$^{15}NPK$	492	52,8	47,2	-
	РК + ризоагрин	425	95,5	-	4,5
	$^{15}NPK$ + ризоагрин	516	50,4	44,0	5,6
5,5	РК	592	100,0	-	-
	$^{15}NPK$	749	49,5	50,5	-
	РК + ризоагрин	642	92,2	-	7,8
	$^{15}NPK$ + ризоагрин	814	45,6	44,5	9,9
6,5	РК	648	100,0	-	-
	$^{15}NPK$	907	41,4	58,6	-
	РК + ризоагрин	746	86,9	-	17,2
	$^{15}NPK$ + ризоагрин	1007	37,3	50,6	12,1

$HCp_{05}$ : частных различий - 88;  $pH$  - 61; N и ризоагрин - 44 (мг/сосуд).

### АГРОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ АЗОТНЫМ РЕЖИМОМ ЧЕРНОЗЕМНЫХ ПОЧВ

Сведение статей баланса азота удобрений показало, что эффективность использования азота является результатом прямого и косвенного действия на почву и растения. Она определяется процессами внутрипочвенной трансформации, что выражается в формировании запасов минерального (или способного к минерализации) азота и усвоения его растениями в течение онтогенеза. Как в вегетационных опытах, так и в полевых условиях коэффициент использования азота (КИ) связан с потерями (П) и иммобилизацией (И) при обратной зависимости между этими переменными (табл. 15).

Для черноземов выщелоченных среднесиловых среднетяжелосуглинистого гранулометрического состава среднестатистические величины показателей баланса азота в условиях лесостепи правобережного Среднего Поволжья можно принять за стандартные, так как они получены при обобщении большого массива экспериментальных данных. При этом следует ожидать, что если отношение КИ к сумме неиспользованного азота (П + И) в полевых условиях будет больше 0,48, то эффективность азотных удобрений и их вклад в формирование урожайности яровой пшеницы существенно возрастут, а непроизводительные потери снизятся.

Фактические размеры потребления почвенного азота на удобренных вариантах выше, чем без азотных удобрений. В среднем по вегетационным опытам на единицу внесенного азота растения пшеницы дополнительно потребляли 0,1 единицу «экстра»-азота, по микрополевым – 0,05 ед.

В этой связи эффективность азотных удобрений следует характеризовать не по КИ, а по коэффициенту поглощения (КП), позволяющему оценивать потребление как азота удобрения, так и «экстра»-азота. Величина его в условиях вегетационных опытов составляла  $52,0 \pm 7,0$ , в микрополевых –  $36,9 \pm 6,0\%$  к дозе внесенного удобрения.

Следовательно, в условиях лесостепи Поволжья на черноземных почвах баланс азота складывается следующим образом: КИ  $42,0 \pm 3,2$  и  $32,2 \pm 3,9\%$ , иммобилизация  $33,8 \pm 2,8$  и  $38,6 \pm 2,7$ , потери  $24,2 \pm 2,5$  и  $28,4 \pm 2,8\%$  от внесенного количества соответственно для вегетационных и микрополевых опытов.

Регулирование азотного питания яровой пшеницы необходимо проводить с учетом комплекса взаимосвязанных процессов, происходящих в составе азотного фонда почвы и продукционного процесса растений. Для этого вначале должно определяться необходимое количество азота для получения запланированного урожая, а затем с учетом запасов минерального азота в корнеобитаемом слое (0-60 см) и реального высвобождения азота, определенного по АМС, производится корректировка необходимой дозы с учетом свойств почвы, поступления в растения «экстра»-азота и возможного использования азота за счет ассоциативных азотфиксаторов и других источников (рис. 5).

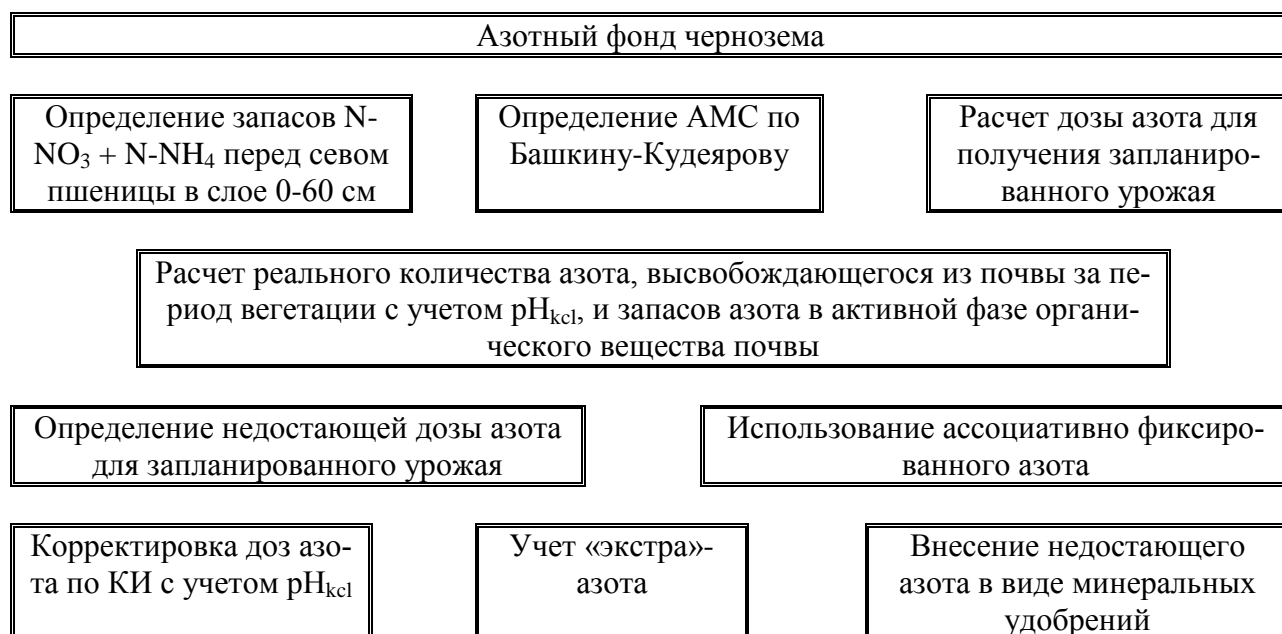


Рис. 5. Агроэкологическая концепция регулирования азотного питания яровой пшеницы.

Таблица 14

## Баланс азота удобрений и использование его растениями яровой пшеницы

Показатель	Коэффициент использования азота растениями (КИ)	Иммобилизованный азот удобрения (И)	Потери азота удобрений (П)	Коэффициент поглощения азота (КП), % к дозе
Вегетационные опыты, n = 48				
Минимум	22,4	19,6	9,2	21,5
Максимум	58,9	59,2	45,2	105,0
Среднее	42,0 $\pm$ 3,2	33,8 $\pm$ 2,8	24,2 $\pm$ 2,5	52,0 $\pm$ 7,0
Стандартное отклонение	10,70	9,69	8,59	24,20
Коэффициент вариации, %	25,5	2,87	35,6	45,6
Уравнения регрессии	КИ=66,21-0,65И; r=0,648; t <sub>f</sub> >t <sub>001</sub> КИ=57,4-0,64П; r=0,513; t <sub>f</sub> >t <sub>001</sub> КИ=24,88 + 0,74 КП; r=0,745; t <sub>f</sub> >t <sub>001</sub>	И= 58,55-0,65 КИ; r=0,648; t <sub>f</sub> >t <sub>001</sub> И = 42,58-0,32 П r=0,321; t <sub>f</sub> >t <sub>05</sub>	П= 41,47-0,51КИ r=0,512; t <sub>f</sub> >t <sub>001</sub> П = 33,77-0,32КИ r=0,321; t <sub>f</sub> >t <sub>05</sub>	КП = -18,85+0,74КИ r=0,745; t <sub>f</sub> >t <sub>001</sub> КП = 25,14+0,71АЭ r=0,708; t <sub>f</sub> >t <sub>001</sub>
Микрополевые опыты, , n = 73				
Минимум	5,4	7,3	6,2	4,5
Максимум	65,6	60,0	56,3	106,2
Среднее	32,2 $\pm$ 3,9	38,6 $\pm$ 2,7	28,4 $\pm$ 2,8	36,9 $\pm$ 6,0
Стандартное отклонение	16,61	11,99	12,04	25,68
Коэффициент вариации, %	51,6	31,0	42,3	69,6
Уравнения регрессии	КИ=69,41-0,70И; r=0,696; t <sub>f</sub> >t <sub>001</sub> КИ=59,77-0,70П; r=0,704; t <sub>f</sub> >t <sub>001</sub> КИ=20,71 + 0,48 КП; r=0,480; t <sub>f</sub> >t <sub>001</sub>	И= 54,81-0,70 КИ; r=0,696; t <sub>f</sub> >t <sub>001</sub> Зависимость И от П несущественная (t <sub>f</sub> <t <sub>05</sub> )	П= 44,83-0,70КИ r=0,704; t <sub>f</sub> >t <sub>001</sub>	КП = 13,02+0,48КИ r=0,480; t <sub>f</sub> >t <sub>001</sub> КП = 25,62+0,77АЭ r=0,758; t <sub>f</sub> >t <sub>001</sub>

Эта концепция позволит выбрать для конкретных условий Поволжья наиболее эффективные и безопасные приемы использования и сочетания технического, биологического и органического азота.

Разработана система мер реабилитации деградированных черноземов за счет использования автогенных восстановительных сукцессий растительности – фитомелиорантов (многолетних бобовых трав), биомелиорантов (навоза, соломы, сидератов) и химической мелиорации, а также доз азотных удобрений, исключая развитие негативных процессов при их использовании.

На основе выявленных взаимосвязей показателей азотного режима почвы и продуктивности сельскохозяйственных культур дана агроэкологическая и природоохранная оценка известкования черноземов (рис. 6, 7).



Рис. 6. Агроэкологические аспекты фитомелиорации черноземных почв

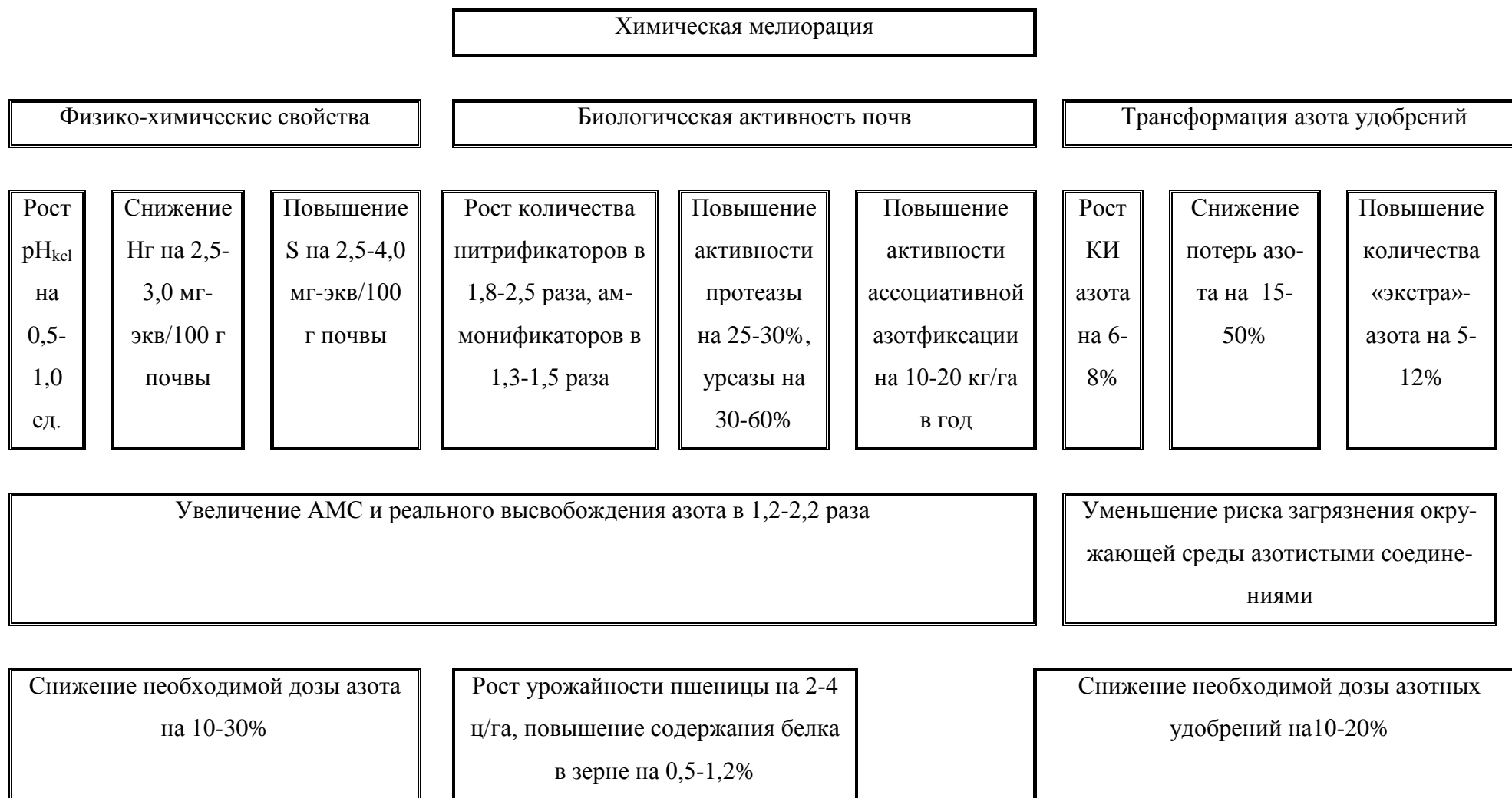


Рис. 7. Экологические аспекты известкования черноземов лесостепи Среднего Поволжья



## ВЫВОДЫ

1. В условиях центральной части лесостепи Среднего Поволжья азотный фонд среднемощных черноземов сложен и представлен различными по составу и свойствам соединениями. Основная часть азота сосредоточена в специфических гумусовых веществах, степень гидролизуемости которых неодинакова, что обуславливает их разную роль в минерализационно-иммобилизационных процессах. На долю легкоразлагаемого органического вещества типа детрита приходится 3,4-4,3% от общего азота почвы. Отличительной особенностью черноземов является невысокое содержание азотистых соединений в первой фракции гуминовых кислот (4,5-6,7%). Во всех изученных почвах основная часть азота гумуса представлена прочносвязанными соединениями фракции 2 гуминовых кислот, предположительно связанных с кальцием.

Антропогенное воздействие оказало существенное влияние на составляющие азотного фонда: уменьшились по сравнению с целиной содержание и запасы общего, органического и азота лабильных соединений; снизилась азотминерализующая способность почв; резко возросло количество минеральных форм, большая часть которых представлена фиксированным аммонием. Запасы доступных форм минерального азота ( $\text{NO}_3^- + \text{NH}_{4\text{обм.}}^+$ ) в метровом слое пахотных почв составляют 120-163-164 кг/га соответственно в ряду черноземов оподзоленные – выщелоченные – типичные.

2. Отличительной особенностью почв региона является недонасыщенность основаниями верхней части профиля, что при длительном агрогенном использовании и техногенном воздействии привело к подкислению всех подтипов черноземов. С изменением реакции почвенной среды меняется направленность процесса минерализации азотсодержащих органических соединений. С увеличением уровня  $\text{pH}_{\text{kcl}}$  чернозема выщелоченного содержание минерального азота и азота легкогидролизуемой фракции возрастает при снижении количества его негидролизуемых форм. Накопление обменного аммония и нитратного азота при изменении реакции среды происходит по-разному: с ростом кислотности (от  $\text{pH}_{\text{kcl}}$  7,5 до 4,5) содержание  $\text{N-NO}_3$  снижается в 5-7 раз, а  $\text{N-NH}_4$  – увеличивается в 3,1-3,5 раза. Систематическое применение минеральных азотных удобрений приводит к достоверному росту абсолютного и относительного содержания минеральных форм азота и способствует миграции нитратов по профилю выщелоченного чернозема. Использование органической системы удобрения и известкования приводит к закреплению запасов доступного растениям азота в пахотном слое.

3. Основным источником азотного питания сельскохозяйственных культур в земледелии лесостепи Поволжья является азот почвы. Доля его в общем выносе основной зерновой культуры – яровой пшеницы – составляет 64-73%. Изменение реакции среды с сильнокислой до нейтральной способствует увеличению размеров потребления азота почвы в 1,7 раза, что связано с процессами дополнительной мобилизации почвенного азота. Наибольшее количество «экстра»-азота в черноземе выщелоченном образуется при реак-

ции среды близкой нейтральной (рН 6,5-7,5) и составляет 0,14-0,15 единиц на единицу внесенного азота удобрения. Повышение доз азота вызывает снижение относительной величины мобилизации азота в 1,7-2,3 раза.

4. Запасы нитратного азота и обменного аммония, определенные в конкретный срок для прогнозирования доз и эффективности азотных удобрений, не отражают фактических изменений в фонде минерального азота в течение вегетационного периода. Суммарной оценкой всех статей азотного баланса является установление потенциала минерализации ( $N_0$ ) или азотминерализующей способности почвы (АМС), которые зависят от особенностей чернозема, количества органического вещества в экосистеме, применяемых систем удобрения и реакции почвенной среды. Количество потенциально минерализуемого азота увеличивается с повышением показателя  $pH_{kcl}$  с 4,5 до 7,5 ед. в 4,7 раза. С изменением величины  $pH_{kcl}$  азотминерализующая способность чернозема меняется: за вегетационный период (май–август) она возрастает с 78 кг/га при рН 4,5 до 188 кг при рН 7,0. При дальнейшем повышении рН происходит затормаживание процесса минерализации. Связь запасов нитратного азота и обменного аммония с урожайностью яровой пшеницы низкая ( $r = 0,02-0,21$ ), с  $N_0$  и АМС средняя ( $r = 0,60-0,87$ ).

5. На основании результатов вегетационных и микрополевых опытов с  $^{15}N$  установлено, что коэффициенты использования азота удобрений яровой пшеницей составляют в вегетационных опытах  $42,0 \pm 3,2\%$ , в полевых условиях –  $32,2 \pm 3,9\%$ . Оптимизация доз и способов применения азотных удобрений в соответствии с биологическими особенностями культуры, известкование кислых черноземов повышают размер использования азота удобрений растениями. Отрицательное действие засухи на использование азота удобрений сглаживается устранением повышенной кислотности почв и глубокой заделкой азота. Установленные закономерности использования яровой пшеницей аммонийного и нитратного азота из разных слоев почвы свидетельствуют о необходимости дифференцированного учета его содержания и доступности при почвенной диагностике азотного питания растений.

6. Размеры иммобилизации азота зависят от степени окультуренности чернозема, видов и форм применяемых удобрений, гидротермических условий периода вегетации. Внесенный азот удобрений независимо от реакции среды первоначально закрепляется в более простых органических соединениях. В течение вегетации устойчивость закрепленного азота возрастает, о чем свидетельствует снижение отношения  $^{15}N_{kcl}:^{15}N_{ng}$  с 6,36 до 1,46, или в 4,36 раза. Известкование сильнокислого чернозема, усиливая микробиологическую активность почвы, изменяет направленность процессов трансформации иммобилизованного азота, снижая закрепление его в трудногидролизуемых и негидролизуемых соединениях.

7. В биоклиматических условиях лесостепного Поволжья, где гидротермический коэффициент меньше единицы, потери азота удобрений за счет инфильтрации незначительны. Возможно лишь вертикальное перемещение нитратов с капиллярной влагой в пределах метрового слоя почвы тяжелосуглинистого чернозема. При росте значений  $pH_{kcl}$  с 4,5 до 7,5 величина потерь азота аммиачной селитры снижается в 1,4-1,6 раза. При известковании и сис

тематическом применении минеральных удобрений на фоне навоза количество неучтенного азота по сравнению с неудобренной почвой уменьшается на 2,6-10,4%. С увеличением доз азота с 40 до 120 кг/га потери его увеличиваются на 9-12%. Оптимизация реакции среды черноземов внесением кальцийсодержащих мелиорантов повышает эффективность внесенного азота, сокращает затраты питательных веществ на формирование урожая и снизит удобрительную нагрузку на агроэкосистемы в условиях лесостепного Поволжья.

8. Урожайность и качество зерна яровой пшеницы в условиях черноземных почв зависят от реакции почвенной среды, обеспеченности растений азотным питанием, гидротермических условий периода вегетации и определяются генотипическими особенностями сортов. Оптимальный уровень  $pH_{kcl}$  для сортов Л-503, Прохоровки и Лады находился в интервале 5,5–6,5, Ишевской — 5,5–7,0, Харьковской-10 — 6,5–7,0 и для Пирамиды — 6,5–7,5. Исследованиями в вегетационных, микрополевых и полевых опытах установлена высокая эффективность нейтрализации повышенной кислотности черноземных почв при возделывании яровой пшеницы. При известковании и улучшении обеспеченности растений влагой окупаемость единицы азотных удобрений возрастает с 1,8 до 9,9, увеличивается содержание белка и клейковины.

9. Разработана агроэкологическая концепция регулирования азотного режима недонасыщенных черноземов лесостепи Среднего Поволжья, основывающаяся на использовании автогенных восстановительных сукцессий растительности — фитомелиорантов (многолетних бобовых трав), биомелиорантов (навоза, соломы, сидератов) и химической мелиорации, исключающих развитие негативных процессов при использовании азотных удобрений.

## **Список основных работ по теме диссертации**

### **монографии и рекомендации**

1. Нижегородцев В.Ф. Рекомендации по известкованию черноземных почв Пензенской области / В.Ф. Нижегородцев, Ю.А. Ларькин, Е.В. Надежкина, Т.Б. Лебедева, Г.Е. Гришин, А.Ф. Блинохватов.- Пенза, 1991.- С. 22-24с.
2. Ковлягин А.Ф. Состояние плодородия почв лесостепи Правобережья Среднего Поволжья / А.Ф. Ковлягин, С.М. Надежкин, Е.В. Надежкина // Плодородие почв и зеленое удобрение. - Москва-Пенза.: Полиграфист, 1997.-С. 5-22.
3. Надежкина Е.В. Формы зеленого удобрения / Е.В. Надежкина // Плодородие почв и зеленое удобрение. - Москва-Пенза.: Полиграфист, 1997.-С. 25-27.
4. Надежкина Е.В. Влияние сидератов на плодородие почвы. Азот / Е.В. Надежкина // Плодородие почв и зеленое удобрение. - Москва-Пенза.: Полиграфист, 1997.-С. 70-81.
5. Кузин Е.Н. Плодородие почв и удобрения. Е.Н. Кузин, Т.Б. Лебедева Е.В. Надежкина, С.М. Надежкин, Ю.В. Корягин.// Поле-технология-урожай (к системе земледелия Пензенской области).- Пенза, ПГСХА, 2000.- С. 25-38.
6. Надежкина Е.В. Бактериальные удобрения / Е.В. Надежкина // Краткий справочник агронома.- Пенза 2002.- С. 90-102.

7. Надежкина Е.В. Экология и агрохимия азота черноземов лесостепи Приволжской возвышенности / Е.В. Надежкина.- М.: Изд-во МГУ, 2003.- 216 с. ISBN 5-211-04892-X.

#### **статьи в центральных журналах**

8. Надежкина Е.В. Действие азотных удобрений и известкования на урожай и качество яровой пшеницы в условиях лесостепи Среднего Поволжья / Е.В. Надежкина, И.А. Шильников, Т.Б. Лебедева // Агрохимия.- 1995.- № 9.- С. 48-53

9. Лебедева Т.Б. Изменение азотного режима чернозема выщелоченного при использовании удобрений / Т.Б. Лебедева, С.М. Надежкин, Е.В. Надежкина // Агрохимия.- 1996.- № 4.- С. 3-8

10. Лебедева Т.Б. Зеленое удобрение на черноземах лесостепи Правобережья Среднего Поволжья / Т.Б.Лебедева, С.М. Надежкин, Ю.В. Корягин, Е.В. Надежкина // Агрохимия. – 1998.- № 3.- С. 38-44

11. Лебедева Т.Б. Многолетние бобовые травы на зеленое удобрение / Т.Б. Лебедева, Ю.В. Корягин, Е.В. Надежкина, С.В. Фомин // Земледелие.- 1998.- № 6.- С. 28-29.

12. Надежкина Е.В. Влияние ризосферных бактерий на формирование урожая зерна проса / Е.В. Надежкина, Е.Г. Сильнова //Агрохимия.- 2001.- № 6.- С. 40-43

13. Надежкина Е.В., Лазарев К.К. Влияние известкования на азотный режим чернозема выщелоченного, урожайность и качество зерна озимой пшеницы / Е.В. Надежкина, К.К. Лазарев // Агрохимия.- 2001.- № 2.- С. 5-11

14. Надежкина Е.В., Влияние реакции среды чернозема выщелоченного на азотный режим, урожайность и качество зерна яровой пшеницы / Е.В. Надежкина, С.М. Надежкин, А.П. Стаценко, К.К. Лазарев // Агрохимия.- 2001.- № 9.- С. 17-25

15. Щербаков А.П. Трансформация азота почвы и удобрений в зависимости от кислотности чернозема выщелоченного / А.П. Щербаков, Е.В. Надежкина, С.М. Надежкин // Доклады РАСХН.- 2003.- № 3.- С.18-21

16. Надежкина Е.В. Баланс и эффективность азотных удобрений при разном уровне кислотности черноземных почв / Е.В. Надежкина // Достижения науки и техники в АПК.- 2003.- № 9.- С. 7-9

17. Надежкина Е.В. Экологические приемы регулирования несимбиотической азотфиксации яровой пшеницы / Е.В. Надежкина // Агро-XX1.- 2003.- № 7-12.- С. 102-103.

18. Надежкина Е.В. Формирование качества зерна яровой пшеницы в зависимости от реакции почвенной среды / Е.В. Надежкина //Зерновое хозяйство.- 2003.- № 8.- С. 18.

19. Ганжара Н.Ф. Агроэкологическая оценка азотного фонда черноземных почв Лесостепи Приволжской возвышенности / Н.Ф. Ганжара, Е.В. Надежкина, С.М. Надежкин // Известия ТСХА.- 2003.- № 9.- С. 3-15.

20. Надежкина Е.В. Регулирование размеров использования азота удобрений агрохимическими приемами / Е.В. Надежкина // Вестник Саратовского ГАУ им. Н.И. Вавилова.- 2003.- № 4.- С. 23-27.

21. Надежкина Е.В. Эколого-агрохимические приемы регулирования потерь азота в черноземных почвах / Е.В. Надежкина, И.А. Шильников, Т.Б. Лебедева // Плодородие.- 2003.- № 6.- С. 14-16.

22. Надежкина Е.В. Продуктивность и качество зерна яровой пшеницы в зависимости от кислотности почвы и обеспеченности минеральными и органическими элементами / Е.В. Надежкина // Сельскохозяйственная биология.- 2004.- № 1.- С. 56-61.

23. Надежкина Е.В. Эффективность ассоциативной азотфиксации и продуктивность фотосинтеза у пшеницы яровой в зависимости от экологических условий и внесения удобрений / Е.В. Надежкина // Сельскохозяйственная биология.- 2004.- № 3.- С. 48-55.

24. Надежкина Е.В. Экологические аспекты влияния реакции среды на азотный режим чернозема выщелоченного / Е.В. Надежкина // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук.- 2004.- № 2.- С. 12-16.

#### **статьи в сборниках**

25. Надежкина Е.В. Усвоение растениями яровой пшеницы минерального азота с различных глубин профиля чернозема выщелоченного лесостепного Среднего Поволжья / Е.В. Надежкина // Бюллетень ВИУА.- М, 1991.- № 104.- С. 41-46.

26. Надежкина Е.В. Влияние известкования на использование азота удобрений, урожай и качество яровой пшеницы на черноземе выщелочен / Е.В. Надежкина, Т.Б. Лебедева // Бюллетень ВИУА.- М, 1991.- № 104.- С. 46-50.

27. Надежкина Е.В. Баланс азота удобрений при известковании // Е.В. Надежкина // Сб. научн. тр. Самарского СХИ. Самара, 1994.- Ч. 1.- С. 126-128.

28. Надежкина Е.В. Превращение азотных удобрений и их эффективность на черноземе выщелоченном лесостепного Поволжья / Е.В. Надежкина // Тезисы докладов 2-ого съезда общества почвоведов России. Санкт-Петербург, 1996.- Книга 1.- С. 379-380

29. Надежкина Е.В. Отзывчивость сортов яровой мягкой пшеницы на уровень азотного питания / Е.В. Надежкина, К.К. Лазарев, О.В. Пиманов / Материалы докладов научной конференции, Пенза, 1996.- С. 14-16.

30. Надежкин С.М. Изменение плодородия чернозема выщелоченного при различных системах удобрений / С.М. Надежкин, Т.Б. Лебедева, Е.В. Надежкина Е.В. // Тезисы докладов 2-ого съезда общества почвоведов России. Санкт-Петербург, 1996.- Книга 1.- С. 378-379.

31. Надежкина Е.В. Попроси займы у почвы / Е.В. Надежкина // Сб. материалов научно-практической конференции. Пенза, 1996.- С. 34-36.

32. Надежкина Е.В. Иммобилизация азота удобрений в черноземе выщелоченном / Е.В. Надежкина, Т.А. Власова, Т.Б. Лебедева // Сборник научн. тр. Саратовской ГСХА. Пути повышения эффективности использования сельскохозяйственных земель. - 1997.- С. 206-213

33. Заварзин А.И. Урожайность и качество зерна яровой пшеницы при разных уровнях азотного питания / А.И. Заварзин, Е.В. Надежкина // Сборник научн. тр. Саратовской ГСХА. Пути повышения эффективности использования сельскохозяйственных земель. - 1997.- С. 91-98

34. Надежкина Е.В. Влияние известкования и азота удобрений на минерализацию органического азота чернозема и использование его яровой пшеницей / Е.В. Надежкина // Сборник научн. тр. Саратовской ГСХА. Пути повышения эффективности использования сельскохозяйственных земель. - 1997.- С. 98-104

35. Nadezhkina E.V. Condition of nitric fund an chernozeme leached Forrest-steppe average Povolzhye / E.V. Nadezhkina // Internatuonal conference. Problems of antropogenic soil formation June 16-21, Moscow, 1997.- V.4.- P. 179-181.

36. Надежкин С.М. Биологический азот в агроценозах лесостепи Среднего Поволжья / С.М. Надежкин, Е.В. Надежкина, Ю.В. Корягин, Н.В. Корягина // Материалы выездного заседания РАЕН. Москва - Пенза, 1997.- С. 202-213.

37. Лебедева Т.Б. Состояние плодородия черноземов лесостепного Среднего Поволжья / Т.Б. Лебедева, С.М. Надежкин, Е.В. Надежкина Е.В., Т.А. Власова // Материалы выездного заседания РАЕН. Москва - Пенза, 1997.- С. - 191-202

38. Надежкин С.М. Значение донника белого в биологическом земледелии лесостепи Среднего Поволжья / С.М. Надежкин, Е.В. Надежкина, Ю.В. Корягин // Материалы докладов второго международного симпозиума. Новые и нетрадиционные растения и перспективы их практического использования. (16-20 июня 1997 г.).- Пушино.- Т. 5.- С. 765-768.
39. Надежкина Е.В. Миграция азота в системе почва-вода / Е.В. Надежкина // Материалы Всероссийской научной конференции. Пенза, 1997.- С. 21-24.
40. Надежкина Е.В. Пути повышения доступности для растений азота активной фазы почвы / Е.В. Надежкина, С.М. Надежкин // Тезисы и доклады Всероссийской конференции. Москва, Почвенный инст., 16-18 июня 1998 г.- Т 1.- С.266-267
41. Надежкина Е.В. Трансформация и баланс азота  $^{15}\text{N}$  сульфата аммония в черноземе выщелоченном южной лесостепи Среднего Поволжья / Е.В. Надежкина, Т.А. Власова // Тезисы докладов 1-ой Всероссийской конференции. Лизиметрические исследования почв (М.: МГУ, 6-10 июля 1998). -М, 1998.- С. 110-113
42. Надежкина Е.В. Влияние разных уровней минерального азота на качество зерна яровой пшеницы / Е.В. Надежкина // Тезисы докладов Всероссийского координационного совещания участников Географической сети опытов с удобрениями и агрохимическими средствами. Агрохимические, агроэкологические и экономические проблемы и пути их решения при возделывании зерновых и других культур. М, 1998.- С. 90-92
43. Надежкина Е.В. Особенности трансформации азота различных видов удобрений на черноземах лесостепи правобережного Среднего Поволжья / Е.В. Надежкина // Материалы 5-ой научно-практической конференции. Удобрения и химические мелиоранты в агроэкосистемах (Москва, 7-10 октября 1997 г.). М, 1998.- С. 88-95
44. Надежкина Е.В. О миграции нитратного азота в черноземе выщелоченном лесостепи Среднего Поволжья / Е.В. Надежкина // Сборник трудов Воронежского ГАУ. Черноземы - 2000: состояние и проблемы рационального использования (к 100-летию со дня рождения проф. М.С. Цыганова). Воронеж, 2000.- С. 114-119
45. Надежкин С.М. Трансформация азота в составе органического вещества почвы / С.М. Надежкин, Е.В. Надежкина. // Сборник трудов Воронежского ГАУ. Черноземы - 2000: состояние и проблемы рационального использования (к 100-летию со дня рождения проф. М.С. Цыганова). Воронеж, 2000.- С. 120-126.
46. Надежкина Е.В. Влияние удобрений на содержание минерального азота в полевых севооборотах / Е.В. Надежкина, В.Г. Минеев, К.К. Лазарев, Е.Г. Сильнова. // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Почва-жизнь-благополучие», посвященной 100-летию К.А. Кузнецова, Пенза, 2000.
47. Надежкин С.М. Влияние реакции среды на биологическую и ферментативную активность чернозема выщелоченного / С.М. Надежкин, Е.В. Надежкина. // Бюллетень ВИУА № 114. 60 лет Географической сети опытов с удобрениями. М, ВИУА, 2001.- С. 88-91
48. Надежкина Е.В. Действие известкования на баланс азота аммиачной селитры на черноземе выщелоченном / Е.В. Надежкина. // Бюллетень ВИУА № 115. 60 лет Географической сети опытов с удобрениями. М, 2001.- С. 144-145
49. Надежкина Е.В. Урожайность зерна яровой пшеницы при различных системах удобрения / Е.В. Надежкина. // Материалы юбилейной научно-практической конференции, посвященной 50-летию ПГСХА. «Агроэкологические аспекты повышения эффективности сельскохозяйственного производства», Пенза, 2001.- С. 54-57.
50. Надежкина Е.В. Эффективность инокуляции яровой пшеницы ризоагрином в зависимости от кислотности чернозема выщелоченного / Е.В. Надежкина. // Ма-

териалы 2-ой Международной научно-практической конференции «Почва-жизнь-благополучие», Пенза, 2001.- С. 57-58

51. Надежкина Е.В. Отзывчивость азотного режима чернозема выщелоченного на антропогенное подкисление / Е.В. Надежкина. // Тезисы докладов Всероссийской конференции. Устойчивость почв к естественным и антропогенным воздействиям. М, 2002.- С. 212.

52. Надежкина Е.В. Ферменты азотного обмена в почвах лесостепи Поволжья / Е.В. Надежкина // Материалы международной научно-практической конференции «Экологические аспекты интенсификации сельскохозяйственного производства» Пенза, 2002.- С. 97-99.

53. Надежкина Е.В. Видовая и сортовая отзывчивость яровой пшеницы на изменение кислотности чернозема выщелоченного / Е.В. Надежкина. // Материалы научно-практической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов БГСХА, (4-7 февраля 2002). Улан-Удэ, 2002. С. 57-59

54. Надежкина Е.В. Состояние азотного фонда черноземных почв лесостепи Среднего Поволжья / Е.В. Надежкина. // Сборник материалов всероссийской научно-практической конференции посвященной 50-летию кафедры почвоведения и агрохимии «Проблемы плодородия почв на современном этапе» Пенза 2002 г.- С. 42-44.

55. Надежкина Е.В. Минеральный азот в почвах лесостепи Поволжья / Е.В. Надежкина // Материалы международной научно-практической конференции «Биосферосовместимые и средозащитные технологии при взаимодействии человека с окружающей средой», Пенза, МНИЦ, 2002.- С. 16-18.

56. Надежкина Е.В. Органический азот в почвах лесостепи Поволжья / Е.В. Надежкина. // Материалы международной научно-практической конференции «Биосферосовместимые и средозащитные технологии при взаимодействии человека с окружающей средой», Пенза, МНИЦ, 2002.- С. 18-20.

57. Надежкин С.М. Влияние систем удобрения на плодородие чернозема выщелоченного и продуктивность полевых севооборотов / С.М. Надежкин, Е.В. Надежкина. // Бюллетень ВИУА, 2003.- С. 64-66

58. Лебедева Т.Б. Сидеральные культуры и эффективность их использования на черноземах правобережной лесостепи Поволжья / Т.Б. Лебедева, С.М. Надежкин, Ю.В. Корягин, Е.В. Надежкина // Бюллетень ВИУА, 2003.- С. 222-225.

59. Надежкина Е.В. Дополнительная мобилизация азота почвы в зависимости от уровня кислотности / Е.В. Надежкина // Материалы научно-практической конференции «Проблемы АПК и пути их решения» Пенза 2003 г.- С. 33-35.

60. Надежкина Е.В. Инокуляция яровой пшеницы ризоагрином / Е.В. Надежкина. // Межвузовский сборник физиолого – биологические аспекты обработки семян с/х культур. Ульяновск, 2003.- С. 48-52.